

MARCOS RAEDER FILHO

**CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ALUMINOSO E SUA APLICAÇÃO EM
CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)**

**Dissertação apresentada ao corpo docente do
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil
da Universidade Federal do Paraná, como parte
dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre
em Construção Civil.**

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

CURITIBA

2005

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCOS RAEDER FILHO

CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ALUMINOSO E SUA APLICAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon
Departamento de Construção Civil, UNICAMP

Co-orientador: Prof. MSc. José Marques Filho
Departamento de Construção Civil, UFPR

Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Marcos Antonio Marino
Departamento de Construção Civil, UFPR

MSc. Patrícia Hommerding Pedrozo
Instituto de Tecnologia, LACTEC

Curitiba, 30 de junho de 2005

Ao Único Deus
Aos meus pais, Marcos e Regina
Aos meus irmãos, David e Laylah
Ao meu grande amigo Paulon

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço àquele que, embora detenha em suas mãos todo o conhecimento, toda a sabedoria e os mais diversos mistérios da ciência, com imenso amor e misericórdia se faz presente a cada dia nas coisas mais simples da vida. Ao meu Deus toda a honra.

Agradeço ao meu amigo Vladimir Antonio Paulon não só pela orientação extremamente competente desde a graduação, além da crescente amizade e interesse demonstrados durante todo esse período, mas pelo exemplo de vida, tornando-se um referencial na minha busca constante pelo sucesso acadêmico e profissional.

Ao meu co-orientador José Marques Filho, agradeço por sua amizade, excelente orientação, disponibilidade mesmo nos momentos adversos e, acima de tudo, pelo incentivo freqüente durante o decorrer de todo esse trabalho.

Com muito amor e carinho, aos meus pais e irmãos, que mesmo distantes, têm me sustentado e apoiado em todos os sentidos.

À Patrícia Pedrozo, por ter sido minha orientadora e amiga em diversos momentos no transcorrer dessa dissertação, se dispondo a ensinar e discutir o trabalho de maneira enriquecedora, além de proporcionar todos os recursos necessários para a aquisição de materiais e desenvolvimento do programa experimental.

Ao Sandro Mendes, pela amizade criada e por sua infinita disposição em me orientar e auxiliar na execução dos ensaios experimentais, além de me incentivar e ajudar muito na realização das análises estatísticas.

Agradeço à Lafarge Aluminates pela doação dos materiais necessários à realização da pesquisa, à Vânia Dantas pelo atendimento prestativo em todas as horas, e em especial ao Engenheiro Leandro Sampaio, por ter se tornado um verdadeiro amigo durante esse período, e pelo incansável empenho e vontade demonstrados em informar, orientar e discutir resultados referentes ao material analisado.

À Professora Denise Dal Molin e todo o pessoal do NORIE, que de maneira muito gentil se dispuseram e contribuíram significativamente nas análises e conclusões finais.

Ao Professor Paulo Chamecki e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) por possibilitarem a execução dos ensaios de laboratório, e de quaisquer outros recursos disponíveis no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME).

Aos meus amigos e colegas de trabalho, Betina, Regiane, Waleska, Altair e Tiago, pelos momentos que passamos durante o transcorrer de todo esse trabalho. Agradeço a vocês pela grande amizade, carinho e ajuda incondicional que demonstraram, pelo incentivo nas horas mais difíceis, sem os quais nada disso teria sido realizado, e sem os quais nada disso tem valor.

Aos meus amigos do Laboratório de Materiais e Estruturas, Alan, Anísio, Amauri, Edmílton, Eustáquio, Fabiano, Marcelo e Zorzi, por todo o apoio no desenvolvimento dos ensaios de laboratório.

Ao Prof. José Manoel e todo o pessoal do Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR), Ana Lúcia, Luciane e Rodrigo, pela colaboração com a análise petrográfica e caracterização química dos materiais.

Agradeço muito ao meu tio Welinton, por investir no meu conhecimento e formação durante toda a vida, além de ter sido o primeiro contato, exemplo e motivo de meu interesse pelo estudo da engenharia.

Aos meus tios Rui e Nata, ao meu primo e grande amigo Gustavo, e à minha avó Glória, agradeço pelo sustento, amizade, e amor, além do exemplo de determinação.

Agradeço à minha família em Curitiba, a família Carreiro, Tia Valdete, Tia Valdinéia, Tio Moacir, Gustavo, Bruno, Filipe e Hugo, e a todos aqueles que por ela passaram, pelo carinho e imenso amor. Aos meus amigos e irmãos, Marcos Liebich, Eder Costa, Rodrigo Amato e Viviane Benítez pela grande amizade que formamos, e pela companhia em diversos momentos. A todos vocês, agradeço por fazerem parte da minha vida.

*“[...] todas as coisas começam nele,
e nele encontram seu propósito.”*

Deus não joga dados – Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1. 1 Considerações Iniciais	1
1. 2 Relevância e Justificativa	3
1. 3 Objetivos.....	6
1. 4 Método.....	7
1. 5 Limitações	7
1. 6 Estrutura do trabalho	8
2 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR).....	9
2. 1 Definição	9
2. 2 Histórico e Aplicações.....	11
2. 3 Utilizações	12
2. 4 Estrutura do Concreto	16
2. 4. 1 Agregados	17
2. 4. 2 Pasta de Cimento Hidratada.....	17
2. 4. 2. 1 Porosidade	20
2. 4. 2. 2 Diminuição do tamanho dos grãos dos produtos da hidratação	23
2. 4. 2. 3 Heterogeneidades	23
2. 4. 3 Zona de Transição.....	24
2. 4. 4 Seleção dos Materiais.....	26
2. 4. 4. 1 Cimento	27
2. 4. 4. 2 Agregados.....	29
2. 4. 4. 2. 1 Agregado Graúdo	30
2. 4. 4. 2. 2 Agregado Miúdo	32
2. 4. 4. 3 Água	32
2. 4. 4. 4 Adições Minerais.....	32
2. 4. 4. 5 Aditivos Superplastificantes.....	36
2. 4. 5 Propriedades do Concreto.....	39
2. 4. 5. 1 Propriedades do Concreto de Alta Resistência no Estado Fresco	39
2. 4. 5. 2 Propriedades do Concreto de Alta Resistência no Estado Endurecido.....	42
2. 4. 5. 2. 1 Resistência à compressão	43
2. 4. 5. 2. 2 Resistência à tração.....	45
3 CIMENTOS ALUMINOSOS EM CAR.....	47
3. 1 Introdução	47
3. 2 Hidratação e Resistência.....	49
3. 3 Resistência a Ataques Químicos	59
3. 4 Propriedades Refratárias.....	63
3. 5 Resistência à abrasão e impacto	66
3. 6 Trabalhabilidade do Concreto de Cimentos Aluminosos	67

3. 7 Durabilidade	69
3. 8 Outras Aplicações	72
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	75
4. 1 Planejamento dos Ensaios	76
4. 1. 1 Ensaios Mecânicos	76
4. 1. 2 Ensaios da Microestrutura	80
4. 2 Caracterização dos Materiais	81
4. 2. 1 Cimento	81
4. 2. 2 Sílica Ativa	83
4. 2. 3 Agregados	85
4. 2. 4 Água	89
4. 2. 5 Aditivos	89
4. 3 Proporcionamento dos Materiais	91
4. 3. 1 Produção e preparo dos corpos de prova	93
4. 3. 2 Cura e armazenamento	94
4. 4 Metodologia para execução dos ensaios	95
4. 4. 1 Ensaios Mecânicos	95
4. 4. 2 Ensaios de Microestrutura	97
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	98
5. 1 Considerações Iniciais	98
5. 2 Compatibilidade entre Cimento e Aditivos	99
5. 3 Resistência à Compressão Axial	108
5. 3. 1 Efeito dos fatores relação água/aglomerante, teor de adição e idade na resistência à compressão	113
5. 3. 2 Efeito das adições de sílica ativa em função da relação água/aglomerante	118
5. 4 Resistência à Tração por Compressão Diametral	119
5. 5 Análise da Microestrutura do Concreto	122
6 CONCLUSÃO	127
6. 1 Considerações Iniciais	127
6. 1. 1 Com relação à Compatibilidade entre cimento, aditivos e sílica ativa	128
6. 1. 2 Com relação à Resistência à Compressão	129
6. 1. 3 Com relação à Resistência à Tração por Compressão Diametral	130
6. 2 Sugestões para futuros trabalhos	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
ANEXO A	143
ANEXO B	147
ANEXO C	152
ANEXO D	155

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 – INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C E IDADE SOBRE RESISTÊNCIA E PERMEABILIDADE.....	21
FIGURA 3. 1 – COMPOSIÇÃO DO CIMENTO ALUMINOSO EM COMPARAÇÃO AO CIMENTO PORTLAND	48
FIGURA 3. 2 – TEMPO DE PEGA PARA MISTURAS CONTENDO CIMENTO PORTLAND E CIMENTO ALUMINOSO	51
FIGURA 3. 3 – ESTRUTURA DO ALUMINATO MONOCÁLCICO (CA).....	51
FIGURA 3. 4 – MICROGRAFIA DOS CRISTAIS PSEUDOHXAGONAIS DO CA.....	52
FIGURA 3. 5 – MICROGRAFIA DAS FASES HEXAGONAL E CÚBICA	53
FIGURA 3. 6 – ESCOAMENTO DO AR ATRAVÉS DO CONCRETO.....	55
FIGURA 3. 7 – DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA PARA CONCRETOS DE CIMENTOS ALUMINOSOS.....	56
FIGURA 4. 1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PROJETO FATORIAL FRACIONADO	78
FIGURA 4. 2 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CIMENTO ALUMINOSO.....	82
FIGURA 4. 3 – MICROGRAFIA DA SÍLICA ATIVA	84
FIGURA 4. 4 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA SÍLICA ATIVA.....	85
FIGURA 4. 5 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO	86
FIGURA 4. 6 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO	88
FIGURA 4. 7 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO AGREGADO GRAÚDO	88
FIGURA 5. 1 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)	100
FIGURA 5. 2 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)	101
FIGURA 5. 3 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)	101
FIGURA 5. 4 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)	101
FIGURA 5. 5 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)	102
FIGURA 5. 6 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)	102
FIGURA 5. 7 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)	102
FIGURA 5. 8 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)	103
FIGURA 5. 9 – TEMPO DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ADITIVO A.....	104
FIGURA 5. 10 – TEMPO DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ADITIVO B.....	105
FIGURA 5. 11 – PONTO DE SATURAÇÃO DO ADITIVO A – A/AGL 0,35.....	106
FIGURA 5. 11 – PONTO DE SATURAÇÃO DO ADITIVO A – A/AGL 0,25.....	107
FIGURA 5. 12 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,23	113
FIGURA 5. 13 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,25	114

FIGURA 5. 14 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,28	114
FIGURA 5. 15 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,32	114
FIGURA 5. 16 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,37	115
FIGURA 5. 17 – LEI DE COMPORTAMENTO GERAL DO EFEITO ISOLADO DA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	115
FIGURA 5. 18 – LEI DE COMPORTAMENTO GERAL DO EFEITO ISOLADO DA IDADE SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	116
FIGURA 5. 19 – LEI DE COMPORTAMENTO GERAL DO EFEITO ISOLADO DO TEOR DE ADIÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	116
FIGURA 5. 20 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE ADIÇÃO E A RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE.....	118
FIGURA 5. 21 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	121
FIGURA 5. 22 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,23 SEM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 100x (b) AUMENTO DE 150x.....	123
FIGURA 5. 23 – MICROGRAFIA DE CONCRETO (PORO) COM RELAÇÃO A/AGL 0,23 SEM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – AUMENTO DE 3000x	123
FIGURA 5. 25 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,28 e 10% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 3000x (b) AUMENTO DE 1500x.....	124
FIGURA 5. 27 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,28 E 10% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 1500x (b) AUMENTO DE 100x	124
FIGURA 1. C – IMAGEM MICROGRÁFICA EM LUZ POLARIZADA.....	154
FIGURA 1. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,23; TEOR DE SÍLICA 0%).....	156
FIGURA 2. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,23; TEOR DE SÍLICA 0%).....	156
FIGURA 3. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%).....	157
FIGURA 4. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%).....	157
FIGURA 5. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%).....	158
FIGURA 6. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%).....	158
FIGURA 7. D – EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%).....	159
FIGURA 8. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%).....	159
FIGURA 9. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%).....	160
FIGURA 12. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,32; TEOR DE SÍLICA 15%).....	160
FIGURA 13. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,37; TEOR DE SÍLICA 0%).....	161
FIGURA 14. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,37; TEOR DE SÍLICA 20%).....	161

LISTA DE QUADROS E TABELAS

TABELA 2. 1 – CONSUMO DE MATERIAIS - EXECUÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO	13
TABELA 4. 1 – PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS – PROJETO FATORIAL CRUZADO	79
TABELA 4. 2 – ALEATORIZAÇÃO DA ORDEM DE EXECUÇÃO DOS TRAÇOS	80
TABELA 4. 3 – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CIMENTO ALUMINOSO	81
TABELA 4. 4 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO ALUMINOSO	81
TABELA 4. 5 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO ALUMINOSO	82
TABELA 4. 6 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA SÍLICA ATIVA	83
TABELA 4. 7 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA	83
TABELA 4. 8 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO	85
TABELA 4. 9 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	85
TABELA 4. 10 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO	86
TABELA 4. 11 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	87
TABELA 4. 12 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO AGREGADO GRAÚDO	87
TABELA 4. 13 – CARACTERIZAÇÃO CRISTALOGRAFICA DO AGREGADO GRAÚDO	88
TABELA 4. 14 – CARACTERÍSTICAS DOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES	90
TABELA 4. 15 – TRAÇOS DE CONCRETO EM MASSA	92
TABELA 5. 1 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	108
TABELA 5. 2 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	109
TABELA 5. 3 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	111
TABELA 5. 4 – PARÂMETROS ESTIMADOS PARA AS VARIÁVEIS DE CONTROLE	111
TABELA 5. 5 – VALORES OBTIDOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	112
TABELA 5. 6 – VALORES PREVISTOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	112
TABELA 5. 7 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	119
TABELA 5. 8 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	120
QUADRO 1. A – TRAÇOS DE CONCRETO CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS POR M ³ DE CONCRETO – 1ª REPETIÇÃO	144
QUADRO 2. A – TRAÇOS DE CONCRETO – 1ª REPETIÇÃO	144
QUADRO 3. A – TRAÇOS DE CONCRETO – 1ª REPETIÇÃO	145
QUADRO 4. A – TRAÇOS DE CONCRETO – 2ª REPETIÇÃO	145
QUADRO 5. A – TRAÇOS DE CONCRETO – 2ª REPETIÇÃO	146
QUADRO 6. A – TRAÇOS DE CONCRETO – 2ª REPETIÇÃO	146
QUADRO 1. B – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	148
QUADRO 2. B – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	149
QUADRO 3. B – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)	150
QUADRO 4. B – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)	151
QUADRO 1. C – MINERALOGIA DA ROCHA	153

RESUMO

A disseminação de princípios relacionados à ciência dos materiais proporcionou um desenvolvimento tecnológico significativo do concreto nas últimas décadas. O desempenho mecânico, além da durabilidade são algumas das propriedades que mais evoluíram nesse período, resultando num produto com características singulares, denominado concreto de alta resistência (CAR). A utilização desse material é interessante ao permitir a redução de deformações, permeabilidade, seções de peças estruturais, custos, além de proporcionar maior velocidade de execução de obras, construção de vãos maiores em elementos estruturais, entre diversas outras características.

A busca por um produto cada vez mais adequado em relação ao constante progresso da engenharia de materiais tem direcionado alguns estudos relacionados à utilização dos cimentos aluminosos como constituintes do concreto. O cimento aluminoso foi inicialmente desenvolvido na França, cujo objetivo era aumentar a durabilidade de estruturas de concreto sujeitas ao ataque por sulfatos. Contudo, devido a algumas propriedades distintas em relação ao cimento Portland, como alta resistência inicial, resistência à abrasão, desenvolvimento da resistência sob condições de baixa temperatura, propriedades refratárias, entre outras, estenderam sua aplicação a diversas áreas da construção. Entretanto, no Brasil não há um número razoável de estudos ou pesquisas publicadas relacionados à utilização do cimento aluminoso em aplicações estruturais ou quaisquer outras áreas da construção civil.

Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo principal a contribuição ao estudo do comportamento mecânico do concreto de alta resistência contendo cimentos aluminosos, mais especificamente, alguns dos fatores que influenciam a resistência à compressão e resistência à tração, como a adição de sílica ativa, relação água/aglomerante e o grau de hidratação. Para uma melhor compreensão do comportamento mecânico do concreto realiza-se uma investigação em sua microestrutura. Além disso, através de ensaios de compatibilidade, são analisados os efeitos de alguns dos principais aditivos superplastificantes comumente utilizados na produção de concreto de alta resistência com cimento Portland na reologia de misturas contendo cimentos aluminosos.

ABSTRACT

The dissemination of some principles related to the science of materials provided significant technological development of the concrete in the last past years. The mechanical performance, beyond the durability of such material, is some of the properties that had more evolved in this period, resulting in a product with singular characteristics, called High-Strength Concrete. The use of this material is interesting when allowing the reduction of deformations, permeability, sections of structural members, costs, besides providing a greater execution speed, and diverse other characteristics.

The search for a better product related to the constant progress of the engineering of materials has directed studies related to the use of calcium-aluminate cements as constituents of concrete. The calcium-aluminate cement was originally developed in France, whose objective was to provide improve durability of concrete in sulphate bearing environments. However, due some unique properties comparing to Portland cements, as high initial resistance, abrasion resistance, rapid hardening under very cold climatic conditions, refractory properties, among others, extended the range of application to many other areas around the world. However, in Brazil there are not a reasonable number of studies or research published relating the use of the calcium-aluminate cements in structural applications or any other areas of civil engineering.

Therefore, this work has as main objective the contribution to study the mechanical behavior of high-strength concrete using calcium-aluminate cements, more specifically, some of the factors that can influence the compressive strength and tensile splitting strength, as the use of silica fume, water/binder relation and age. For a better understanding of the mechanical behavior of concrete, a research on its microstructure is performed. Moreover, through compatibility assays, the effect of some of main superplasticizers admixtures frequently used to produce high-strength concretes using Portland cement are analyzed on the rheology of mixtures containing calcium-aluminate cements.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O desenvolvimento tecnológico aliado à evolução do conhecimento humano impõe aos materiais estruturais a necessidade de uma superação constante no seu desempenho mecânico e durabilidade. Segundo MEHTA (1999), a aplicação dos princípios da Ciência dos Materiais à tecnologia de produção do concreto oferece a expectativa de um produto consideravelmente superior em relação à resistência, elasticidade e tenacidade, quando comparável ao disponível atualmente.

A maioria dos projetistas cerca de cinquenta anos atrás estava satisfeita com projetos estruturais baseados em concretos com resistência à compressão limitada em 20 MPa devido principalmente ao conhecimento da época e, portanto, economia e segurança proporcionadas. Além disso, acreditava-se que a aplicação do concreto estaria restrita principalmente às estruturas horizontais, fundações, pisos ou como elementos de proteção contra o fogo. (AİTCIN, 2000).

Entretanto, com o intuito de atender às necessidades do setor de construção de edifícios com grande altura no final dos anos 60, o concreto de alta resistência (40 a 50 MPa) passou a ser utilizado comercialmente em quantidades significativas na maioria das estruturas (FREEDMAN, 1971). Com a evolução dos aditivos redutores de água, concretos com resistência à compressão acima de 60 MPa já eram produzidos comercialmente (MEHTA, 1999; PHELAN, 1998).

Segundo diversos autores (AİTCIN e NEVILLE, 1993; DAL MOLIN, 1995; HELENE e HARTMANN, 2003), o concreto de alta resistência foi inicialmente desenvolvido para ser utilizado como elemento estrutural em pontes e edifícios com grandes alturas. Em tais edifícios o aumento da capacidade de carregamento permite a execução de pilares e vigas de menores dimensões, resultando em maior área útil aos pavimentos, principalmente nos andares inferiores sobrecarregados, reduzindo a carga

permanente da estrutura e a carga nas fundações. Dessa forma, além da viabilidade técnica, as estruturas mais esbeltas geram aumento da área rentável. Como elemento estrutural em pontes, a aplicação do concreto de alta resistência gera um aumento significativo na relação entre resistência à compressão e peso, volume e custo. Além disso, segundo CARPENTER (apud DAL MOLIN, 1995), através da utilização desse material é possível obter maior módulo de deformação, propriedade interessante quando deflexões controlam o projeto; maior resistência à tração, principal parâmetro de controle no projeto de elementos estruturais de concreto protendido; e execução de vãos maiores.

Outras vantagens da utilização de concreto de alta resistência são:

- baixa permeabilidade, porosidade e, conseqüentemente, maior durabilidade aos ambientes agressivos sujeitos à ação da erosão, abrasão e ataques químicos;
- redução de deformações instantâneas devido ao maior módulo de deformação;
- redução de deformações a longo prazo e fluência;
- material disponível;
- vantagens econômicas, ecológicas e energéticas, quando são utilizados resíduos industriais como adição ao concreto;
- redução de reações de expansão quando utilizadas determinadas adições minerais.

Além disso, a utilização do concreto de alta resistência na construção permite maior velocidade de execução das obras, o que resulta em aumento do fluxo de caixa. Esse aumento é de extrema importância em uma era de altas taxas de juros.

Atualmente, a aplicação do concreto de alta resistência está estendida a diversos tipos de estruturas, e não somente a edifícios altos e pontes. As principais aplicações são: plataformas marítimas (ALAEJOS e CÁNOVAS, 1992; AİTCIN, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 1994), pavimentos rodoviários (MOORE, 1999; BALBO, 1999), reatores nucleares (DE LARRARD et al., 1990), túneis submarinos (ALAEJOS e CÁNOVAS, 1992), reparos e recuperação de estruturas (CHORINSKY, 1999), pré-moldados (SCRIVENER, 2001), entre outros.

1. 2 Relevância e Justificativa

O constante desenvolvimento mundial requer que os materiais de construção e, dessa forma, o concreto, sejam cada vez mais aproveitados e aperfeiçoados para acompanhar tal progresso . Uma forma de buscar um produto melhor e mais adequado é a utilização dos cimentos aluminosos como constituintes do concreto. De acordo com NEVILLE (1998) o cimento aluminoso possui diversas propriedades singulares quando comparado ao cimento Portland, como altas resistências iniciais, desenvolvimento da resistência mesmo sob condições de baixas temperaturas, e durabilidade superior ao ataque por sulfatos.

O cimento aluminoso foi desenvolvido na França no começo do século XX como uma alternativa ao problema de ataque das estruturas de concreto por águas sulfatadas. A comercialização desse material cresceu durante a Primeira Guerra Mundial, levando ao uso substancial em estruturas de concreto expostas ao mar e fundações em solos com alto teor de sulfatos. Contudo, a alta reatividade e versatilidade dos cimentos aluminosos permitiram o emprego desse material em diversas outras aplicações.

Algumas dessas aplicações são as escavações de túneis, construção de minas na África do Sul, Canadá e Austrália, entre outras, graças à alta taxa de evolução da resistência. Em outros países, principalmente no Reino Unido, os danos causados pela Segunda Guerra originaram um crescimento acelerado na construção civil da época. Os processos de cura a vapor para concreto pré-moldado de cimento Portland não tinham sido bem desenvolvidos e, conseqüentemente, o rápido endurecimento do concreto de cimento aluminoso proporcionou sua utilização em diversas estruturas pré-moldadas e protendidas. Além dessas aplicações, a alta taxa de evolução de calor durante a hidratação estendeu a utilização do cimento aluminoso a concretagens em clima frio, levando a várias aplicações no Ártico (SCRIVENER, 2001).

Em alguns países como a África do Sul, onde alguns efluentes são extremamente agressivos devido a fatores hidráulicos ou descargas industriais com baixo pH, canais de

concreto com cimentos aluminosos estão sendo produzidos. A escolha desse material dá-se pelo fato de apresentar uma alta capacidade de neutralização ácida, resistindo melhor ao ataque sulfúrico biológico que canais produzidos com cimento Portland. (ALEXANDER e FOURIE, 2001; GOYNS, 2001).

Além disso, segundo SCRIVENER (2001) a alta resistência à abrasão e impacto devido à natureza da zona de transição entre a pasta e agregado permitiu a utilização do concreto contendo cimentos aluminosos em estruturas hidráulicas sujeitas ao desgaste, como vertedouros, comportas deslizantes e linhas de túneis de limpeza na França, Suécia, Peru, entre diversos outros países.

As propriedades mecânicas, comportamento durante a cura e calor inicial das misturas de cimentos aluminosos são características singulares decisivas em aplicações refratárias (NORTON-BERRY; GHANBARI AHARI; LEE, 2001). O concreto de cimento Portland exposto a altas temperaturas, de acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), forma óxido de cálcio livre através da decomposição do hidróxido de cálcio, o que causa a deterioração do concreto aquecido ao ser exposto à umidade ou à água. Entretanto, o cimento aluminoso não produz hidróxido de cálcio durante a hidratação. NEVILLE (1997) comenta que até cerca de 500°C, os concretos de cimento aluminoso perdem resistência em proporção maior do que aqueles contendo cimento Portland; a partir desse valor até 800°C, os dois são comparáveis, mas acima de cerca de 1000°C, o cimento aluminoso tem um desempenho consideravelmente melhor.

A despeito das diversas aplicações para o concreto de cimentos aluminosos, alguns acontecimentos envolvendo a utilização desse material geraram um clima de incerteza quanto à sua utilização. Dessa forma, mudanças nas normas foram feitas para prevenir efetivamente o uso desse material em aplicações estruturais (ANDIÓN; GARCÉS; CASES, 2001).

O processo de degradação identificado e mais conhecido que sofrem os cimentos aluminosos é o chamado de conversão dos hidratos hexagonais de aluminato de cálcio para a forma cúbica. Esta conversão é usualmente seguida de uma perda de resistência.

Segundo diversos autores (ANDIÓN e GARCÉS, 2001; SCRIVENER, 2001), o conhecimento insuficiente, a falta de entendimento sobre a química e comportamento cristalográfico a longo prazo desse tipo de cimento e, principalmente, a falta de prática de regras adequadas à utilização, além da atenção a parâmetros como relação água/cimento e conteúdo de cimento, que são importantes para o concreto de cimento Portland e se tornam críticos quando o cimento aluminoso é utilizado, levaram a casualidades fatais envolvendo a utilização desses materiais.

Tais acontecimentos ilustram a importância do conhecimento sobre o comportamento dos concretos contendo cimentos aluminosos a idades mais avançadas. Com este fim, um estudo foi desenvolvido pela Concrete Society no Reino Unido readmitindo a utilização dos cimentos aluminosos na construção civil. Suas descobertas foram publicadas em 1997, e suas conclusões reafirmaram que qualquer projeto estrutural deve ser baseado na resistência após o processo de conversão, e alguns parâmetros relacionados ao consumo de cimento e relação água/cimento devem ser observados.

Após quase um século de experiência, as aplicações dos cimentos aluminosos são cada vez mais diversas. O custo desse material significa que não é um substituto para o cimento Portland em aplicações onde este último apresente desempenho favorável. Todavia, onde seu custo seja justificado por suas propriedades distintas, isto estenderá o campo de aplicações de materiais cimentícios em geral (SCRIVENER, 2001).

Segundo SCRIVENER et al. (1999), uma visão mais abrangente das propriedades do concreto e dos materiais cimentícios indicará ambientes alternativos onde o concreto poderá competir com outros tipos de materiais na busca de um produto que proporcione altos níveis de desempenho. No Brasil não há um número razoável de pesquisas e estudos publicados que criem uma diretriz segura para a produção e emprego dos cimentos aluminosos em aplicações estruturais. Conforme observa DAL MOLIN (1995), não devem ser importadas soluções sem a perfeita adaptação à realidade brasileira. Sendo assim, impõe-se que sejam desenvolvidas pesquisas relacionadas à aplicação dos cimentos aluminosos utilizando materiais e técnicas nacionais.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desse estudo consiste na análise do cimento aluminoso quanto à sua aplicação em concretos de alta resistência para elementos estruturais.

Serão realizados ensaios laboratoriais para determinar algumas propriedades básicas do material, a saber: resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral. Através da realização de ensaios verificar-se-á a influência da idade, relação água/aglomerante e teor de sílica ativa em tais propriedades.

Além disso, ao considerar as aplicações do cimento aluminoso em concreto é necessário discutir características principais de trabalhabilidade desse material. Segundo SCRIVENER (2001), os tipos clássicos de superplastificantes utilizados em misturas contendo cimento Portland (lignossulfatos e polinaftalenos sulfonados) têm somente um efeito modesto quando aplicados conjuntamente com cimentos aluminosos. Porém, efeitos melhores na trabalhabilidade e reologia do concreto podem ser esperados ao serem utilizados aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos. Ainda de acordo com o referido autor, a compatibilidade entre uma reologia adequada e tempo de pega normal pode ser atingida através de teores adequados de tais aditivos, além do ajuste do tempo de adição e tempo de mistura.

Não há literatura disponível no país que discuta a compatibilidade entre cimentos aluminosos e aditivos. Portanto, tem-se como objetivo secundário analisar os efeitos de alguns dos principais aditivos superplastificantes comumente utilizados em concreto de cimento Portland na reologia de misturas contendo cimentos aluminosos. Tais efeitos serão observados através da realização de ensaios de compatibilidade entre cimentos aluminosos e aditivos. Outro objetivo é fornecer parâmetros para o melhor entendimento em relação ao comportamento mecânico de concretos contendo cimentos aluminosos e, dessa forma, contribuir para sua utilização com maior segurança e discernimento.

1.4 Método

Tendo sido escolhido o tema da pesquisa, ou seja, o estudo dos cimentos aluminosos e sua aplicação em concretos de alta resistência, como forma de abordagem optou-se primeiramente pela análise de compatibilidade entre cimentos aluminosos e aditivos e adições comumente empregadas na produção de concretos de alta resistência com cimento Portland. Definido o aditivo que apresentou melhor desempenho, foram investigados os efeitos das adições, grau de hidratação, e relação água/aglomerante nas propriedades das misturas de concreto com cimentos aluminosos.

O programa experimental foi desenvolvido com base em um projeto de experimento. Após a coleta de dados, os mesmos foram submetidos à análise estatística, sendo em seguida interpretados e discutidos conforme será apresentado no decorrer desse estudo.

1.5 Limitações

As propriedades mecânicas dos concretos estão relacionadas a diversas fontes de variabilidade. As principais são: relação água/aglomerante, tipo e teor de adição, tipos e teores de aditivos, grau de hidratação, tipo e consumo de cimento, tipo e dimensão máxima característica do agregado graúdo, módulo de finura do agregado miúdo, entre muitos outros.

DAL MOLIN (1995) comenta que à medida em que o número de variáveis a serem analisadas em um programa experimental aumenta, o número de combinações cresce muito rapidamente, inviabilizando sua execução. Tendo em vista os diversos fatores que influenciam as propriedades do concreto e a incapacidade de abordá-los simultaneamente em um único programa experimental, além da limitação de recursos e tempo, fez-se necessário estabelecer limites ao programa desenvolvido. Sendo assim, foram analisados apenas alguns dos fatores que influenciam as propriedades mecânicas do concreto. Os

fatores escolhidos foram: relação água/aglomerante, idade de hidratação e teor de sílica ativa.

1. 6 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho é composta por seis capítulos, conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1 apresenta o assunto no qual se insere o tema desse estudo, a relevância do mesmo, além dos objetivos a serem atingidos. Também estão descritos o método e as limitações do trabalho em questão.

Em seguida, nos capítulos 2 e 3, a revisão bibliográfica é apresentada. No Capítulo 2 estão abordados aspectos relacionados ao concreto de alta resistência. Partindo-se da definição, histórico e aplicações desse material, são descritas as características de cada um de seus materiais constituintes, além das propriedades do concreto de alta resistência no estado fresco e endurecido. Já o Capítulo 3 discorre sobre a utilização dos cimentos aluminosos em concretos desde o início de seu desenvolvimento no começo do século XX até as mais diversas aplicações da era atual. Neste capítulo são descritas algumas de suas propriedades singulares como reações de hidratação, desenvolvimento da resistência, resistência aos ataques químicos, abrasão e impacto, trabalhabilidade, propriedades refratárias, além de durabilidade dos concretos de cimentos aluminosos.

No Capítulo 4 o programa experimental é discutido, onde são apresentadas todas as etapas relacionadas aos ensaios, desde a caracterização dos materiais utilizados, variáveis adotadas, planejamento, procedimentos, bem como as justificativas para as decisões tomadas.

A apresentação dos resultados obtidos através dos ensaios mecânicos e de microestrutura, além da análise estatística e discussão de tais resultados, é apresentada no Capítulo 5. Nesse capítulo os argumentos são embasados na revisão bibliográfica, com considerações sobre os resultados fundamentados em análise estatística. O Capítulo 6 é constituído das conclusões finais do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

2 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)

2.1 Definição

O Comitê 363 do ACI (1991, 1998) define como Concreto de Alta Resistência aquele cuja resistência à compressão aos 28 dias é superior a 41 MPa (6000 psi). Todavia, o comitê reconhece que a definição para esta classe varia de acordo com as regiões. Em alguns locais, concretos com resistência à compressão igual a 62 MPa (9000 psi) são produzidos comercialmente, logo, é considerado de alta resistência o concreto que apresente resistência à compressão na faixa entre 83 e 103 MPa (12000 a 15000 psi). Já em locais onde o limite máximo de resistência à compressão de concreto comercializado se situa por volta de 34 MPa (5000 psi), concretos de 62 MPa podem ser considerados de alta resistência. NAWY (1996) comenta que o conceito de concreto de alta resistência é relativo, pois uma resistência considerada normal ou convencional para uns, pode ser definida como alta para outros.

De acordo com SHAH (1981), quando utilizados agregados normais, são considerados concretos de alta resistência aqueles cuja resistência à compressão é maior que 41 MPa. O autor justifica tal definição utilizando os seguintes argumentos:

- 1) A produção de concreto com resistência superior a 41 MPa requer maior rigor no controle de qualidade e na seleção e dosagem dos materiais constituintes (cimento, aditivos plastificantes e superplastificantes, adições minerais, tipo e tamanho dos agregados). Dessa forma, distingue-se este tipo de concreto, denominando-o de alta resistência.
- 2) Estudos experimentais apresentam diversas diferenças na microestrutura e propriedades de concretos com resistência superior a cerca de 41 MPa, quando comparados a concretos de resistência inferior a esse limite. Portanto, faz-se

necessária a diferenciação dessa classe, visto que as normas utilizadas para o dimensionamento de estruturas deverão ser ajustadas e adequadas para aplicação em concretos de alta resistência.

AİTCIN (2000) define concreto de alta resistência ou concreto de alto desempenho, essencialmente o concreto com relação água/aglomerante abaixo de 0,4. O autor sugere este valor como o limite entre concretos convencionais e concretos de alta resistência devido ao fato de ser muito difícil produzir concreto com boa trabalhabilidade e lançamento adequado utilizando tal relação e materiais convencionais sem a utilização de aditivos superfluidificantes. Além disso, este valor está próximo do sugerido por POWERS (apud AİTCIN, 2000) para assegurar completa hidratação do cimento Portland, e concretos com tal relação começam a apresentar retração autógena. Contudo, a diferença de valores de relação água/aglomerante não se apresenta somente na alteração da resistência à compressão, mas também na diferença em sua microestrutura e desempenho em todos os sentidos (NEVILLE, 2000).

AİTCIN (2000) ainda sugere uma divisão para concretos com resistência superior a 50 MPa, dividindo a faixa de alta resistência em cinco classes correspondentes a incrementos de 25 MPa. A classe I representa concretos com resistência à compressão entre 50 e 75 MPa, a classe II é composta por concretos com resistência à compressão entre 75 e 100 MPa, a classe III entre 100 e 125 MPa, já a classe IV entre 125 e 150 MPa e a classe V para concretos com resistência superior a 150 MPa.

Entretanto, após a publicação com definições do concreto de alta resistência pelo Comitê 363 do ACI (1991, 1998), diversos estudos foram realizados e publicados, e o conhecimento sobre este material se desenvolveu. Tal desenvolvimento, assim como a publicação do Código Modelo do CEB (1991), da norma norueguesa (NS 3473, 1992) e normas francesas (BAEL e BPEL, apud PLISKIN, 1992), proporcionou a publicação em 1992 pela ABNT da norma NBR 8953. Esta norma classifica os concretos em Classes I e

II. A primeira classe considera concretos com resistência até 50 MPa, e a segunda classe compreende concretos com resistência superior a 50 MPa. Dessa forma, tal valor pode ser considerado como o limite entre concreto convencional e concreto de alta resistência no Brasil.

A despeito das diversas definições para concretos de alta resistência, será adotada a definição colocada pela NBR 8953 (1992), que estabelece concretos de alta resistência aqueles cuja resistência à compressão é igual ou superior a 50 MPa.

2. 2 Histórico e Aplicações

O espírito pioneiro de um pequeno grupo de projetistas e produtores de concreto permitiu o “lançamento” do concreto de alta resistência na metade dos anos 60. Durante essa época grande parte dos projetistas estava satisfeita em projetar estruturas baseadas em concretos com resistência à compressão entre 15 e 20 MPa, devido ao conhecimento, economia e segurança proporcionados. Além disso, a aplicação do concreto estava restrita à execução de estruturas horizontais, fundações, pisos e elementos de proteção contra o fogo (AÏTCIN, 2000).

Entretanto, no começo dos anos 60, na região de Chicago, concretos de alta resistência (40 a 50 MPa) começaram a ser utilizados comercialmente em quantidades significativas na maioria das estruturas (FREEDMAN, 1971). Contudo, o avanço da resistência à compressão de concretos utilizados nas altas edificações parou por volta dos 60 MPa, devido às limitações técnicas dos aditivos redutores de água da época (BLICK, PETERSEN e WINTER, 1974).

O advento dos aditivos superfluidificantes no final dos anos 60, início dos anos 70, permitiu a quebra no limite da resistência, e concretos com resistência à compressão acima de 60 MPa passaram a ser produzidos comercialmente (MEHTA, 1999; PHELAN, 1998).

AİTCIN (2000) comenta que os constantes avanços na tecnologia do concreto continuam a surpreender a comunidade relacionada a tal material através dos resultados apresentados a cada ano. BACHE (1981) apresentou um estudo onde foi produzido micro-concreto com relação água/aglomerante igual a 0,16. Nesse trabalho foi utilizado agregado bauxita, alta dosagem de superplastificante e um cimento ultrafino, além de procedimentos de cura específicos. Foram atingidos valores de resistência à compressão iguais a 280 MPa. Os resultados do estudo foram obtidos em laboratório, com materiais e técnicas específicas, contudo, mostram que os avanços em tecnologia do concreto são constantes na busca de um melhor aperfeiçoamento de suas propriedades. Segundo AİTCIN e MEHTA (1993), concretos com resistência na faixa de 90 até 120 MPa estão sendo produzidos comercialmente com técnicas rotineiras que já fazem parte do campo da construção de edifícios altos e pontes.

2.3 Utilizações

As principais aplicações do concreto de alta resistência na construção civil encontram campo na execução de edifícios de grande altura e pontes (AİTCIN e NEVILLE, 1993; DAL MOLIN, 1995; HELENE e HARTMANN, 2003). Isto ocorre em função das diversas vantagens que este material oferece em relação a outros materiais estruturais, como o aço, ou mesmo concreto convencional (WEBB, 1993; MEHTA, 1999). Um exemplo é relatado por MORENO (1998), onde estudos comprovaram que o aumento de 3,1 vezes no preço resulta em acréscimo de 4,7 vezes na capacidade de carregamento em edifícios de pavimentos múltiplos.

O aumento da capacidade de carregamento permite a execução de pilares e vigas de menores dimensões, gerando maior área útil para os pavimentos, principalmente nos andares inferiores e sobrecarregados, reduzindo a carga permanente da estrutura e fundações (DAL MOLIN, 1995). Além da viabilidade técnica, as estruturas mais esbeltas geram aumento da área rentável. Outras vantagens já mencionadas da utilização de

concreto de alta resistência em estruturas são a baixa permeabilidade e porosidade proporcionadas e, conseqüentemente, maior durabilidade a ambientes agressivos, a redução das deformações instantâneas e deformações a longo prazo, a disponibilidade de matéria prima, além de vantagens econômicas, ecológicas e energéticas e redução de reações expansivas, quando são utilizados resíduos industriais em sua produção.

A utilização do concreto de alta resistência na construção de edifícios permite maior velocidade de execução de obras, resultando num aumento do fluxo de caixa, o que tem significativa importância em uma era cercada por altas taxas de juros. Sua aplicação em indústrias de concreto pré-fabricado e protendido também proporciona maior velocidade de execução e rápida troca de moldes. Logo, o concreto de alta resistência gera maior produtividade, além de menor perda de produtos durante o manuseio e transporte. Quanto à durabilidade, o concreto de alta resistência encontrou aplicação em ambientes extremamente agressivos graças à baixa permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

DAL MOLIN e WOLF (1990) desenvolveram um estudo sobre a viabilidade da utilização de concretos de alta resistência em edifícios altos no Brasil. Tal estudo foi realizado em um edifício com 15 pavimentos, comparando a execução com concreto convencional ($f_{ck} = 21$ MPa) e concreto de alta resistência ($f_{ck} = 60$ MPa). Os resultados estão apresentados na Tabela 2. 1. Observa-se que o consumo de materiais é muito menor para o concreto de alta resistência. Sendo assim, os autores realizaram avaliações de custo para os materiais e mão-de-obra e concluíram que houve redução de 12% no custo final da estrutura de concreto de alta resistência em relação ao convencional.

TABELA 2. 1 – CONSUMO DE MATERIAIS - EXECUÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO

	CONCRETO (m ³)			ARMADURA (kg)			FÔRMAS (m ²)		
	<i>fck 21</i>	<i>fck 60</i>	%	<i>fck 21</i>	<i>fck 60</i>	%	<i>fck 21</i>	<i>fck 60</i>	%
PILARES	13,2	6,8	-49	2981	1192	-60	137	93	-32
VIGAS	14,9	12,1	-19	1623	1623	-	180	149	-17
LAJES	27,0	26,1	-3	994	994	-	281	281	-
TOTAL	55,1	45,0	-18	5598	3809	-32	598	523	-12

FONTE: DAL MOLIN e WOLF (1990)

Outro exemplo recente da aplicação do concreto de alta resistência em edifícios de grande altura é a construção das Torres Petronas em Kuala Lumpur, na Malásia (GARZÓN, 2004). Atualmente tais torres detêm o título de edifício mais alto do mundo, ao atingir 451,9 metros de altura, com área igual a 213.750 m², cada uma. A resistência à compressão do concreto utilizado atingiu valores acima dos 80 MPa aos 56 dias de hidratação, e tal material mostrou ser o mais adequado à execução dos pilares e núcleo da estrutura pois permitiu uma redução considerável das deflexões laterais, atenuando as oscilações devido ao vento com maior eficiência ao ser comparado a uma estrutura correspondente utilizando o aço como elemento estrutural.

Além da aplicação do concreto de alta resistência em edifícios, a utilização em pontes está cada vez mais comum, proporcionando maior resistência à compressão por unidade de peso, volume e custo; maior módulo de deformação, característica fundamental quando deflexões controlam o projeto; maior resistência à tração, principal parâmetro de controle em elementos estruturais de concreto protendido; além da execução de vãos com maiores dimensões (CARPENTER apud DAL MOLIN, 1995).

Entretanto, esse material não encontra campo apenas na execução de edifícios ou pontes. Sua aplicação está estendida a diversos tipos de estruturas, como por exemplo: plataformas marítimas (ALAEJOS e CÁNOVAS, 1992; AİTCIN, 2000; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2002), pavimentos rodoviários (MOORE, 1999; BALBO, 1999), reatores nucleares (DE LARRARD et al, 1990), túneis submarinos (ALAEJOS e CÁNOVAS, 1992), reparos e recuperação de estruturas (CHORINSKY, 1990), pré-moldados (AMARAL FILHO, 1988; ROSSIGNOLO, 2004; ROSSIGNOLO et al., 2003).

AİTCIN (2000) apresenta algumas das características e importância da utilização de concreto de alta resistência para o proprietário, o projetista, o empreiteiro, o produtor e o ambiente.

1) Para o proprietário: O objetivo principal do proprietário é o maior retorno possível do investimento durante o tempo de vida do empreendimento. Na maioria dos casos os materiais estruturais são de pouco interesse para o proprietário, contanto que satisfaçam os requisitos funcionais a um preço aceitável. Enquanto os proprietários se preocupam com o acabamento, os materiais estruturais são deixados em segundo plano.

Todavia, a decisão do proprietário pode influenciar significativamente a escolha final do material estrutural. Aumentando a resistência à compressão de 60 a 75 MPa na plataforma marítima TROLL, que foi projetada para uma profundidade de água de 300 metros, foi possível obter redução de aproximadamente 5000 m³ de concreto e economia de US\$ 77 milhões. Dentro do mercado de competitividade da indústria de construção entre o aço, concreto convencional e concreto de alta resistência, as soluções obtidas pela utilização do concreto de alta resistência prevalecem quando oferecem ao proprietário o melhor retorno do investimento sob tais circunstâncias.

2) Para o projetista: A escolha de um projetista para o material estrutural utilizado pode ser influenciada por diversos parâmetros, como por exemplo: requisitos funcionais do proprietário, requisitos estéticos do arquiteto, normas de construção, entre outros. Entretanto, a escolha final é normalmente baseada na percepção técnica e econômica do mercado de construção no qual o empreendimento está inserido (SMITH e RAD, 1989). Portanto, a alternativa para a utilização do concreto de alta resistência não é só devido ao desempenho mecânico, mas pode ser especificado um elevado módulo de elasticidade, alta durabilidade, ou uma combinação de tais fatores.

Em 1960, a utilização de concreto de alta resistência no edifício Water Tower Place em Chicago resultou em menor peso próprio e maior área útil para aluguéis nos pavimentos inferiores. Já a escolha de concreto de alta resistência para Two Union Square em Seattle foi baseada em maior módulo de elasticidade do que resistência, embora tais propriedades estejam relacionadas o objetivo foi uma maior resistência ao vento. Já a execução de diversas plataformas marítimas foi realizada utilizando esse material por apresentar maior durabilidade ao ambiente agressivo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

3) *Para o empreiteiro:* A redução do custo pode influenciar o proprietário na escolha do material e mão de obra. Ao proporcionar a construção de elementos estruturais mais esbeltos, a utilização do concreto de alta resistência permite uma diminuição do custo e redução do tempo de execução de fôrmas, além do tempo de concretagem.

4) *Para o produtor:* A utilização de concreto como material estrutural abrange os diversos centros urbanos e não requer técnicas agressivas de marketing, pois suas características e propriedades são conhecidas. A competição no mercado da construção é quase exclusivamente baseada no preço unitário, ao invés de qualidade do material. Logo, a utilização de concreto de alta resistência resulta em maior velocidade de execução, aumento de área útil e, conseqüentemente, maior velocidade de retorno do investimento.

5) *Para o ambiente:* A utilização do concreto de alta resistência requer maior consumo de energia em comparação ao concreto convencional. Entretanto, os recentes desenvolvimentos nessa área têm levado a um material mais ecológico quando seus componentes são utilizados em seu máximo potencial na produção de um material com um ciclo de vida maior. Sendo assim, sua produção resulta em menores danos ao meio ambiente.

2. 4 Estrutura do Concreto

O conhecimento da estrutura e das propriedades de cada material presente na constituição do concreto, assim como das relações estrutura-propriedade, constitui a essência da moderna ciência dos materiais. O progresso no campo dos materiais resultou principalmente a partir do reconhecimento de que as propriedades de um material têm origem em sua estrutura interna e, portanto, podem ser modificadas através de alterações adequadas em tal estrutura. Sendo assim, o conhecimento da estrutura e propriedades dos constituintes da mistura, além da interação entre os constituintes, é de extrema importância quando se pretende elevar a resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 1995).

Quanto ao concreto, suas propriedades mecânicas estão relacionadas às propriedades da zona de transição, que representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta (PAULON, 1991).

2. 4. 1 Agregados

A produção de concreto convencional não requer a seleção de agregados particularmente resistentes, desde que sejam cumpridas as normas e exigências de desempenho estabelecidas nas mesmas. Todavia, caso as outras fases da mistura sejam mais resistentes, o agregado, principalmente o graúdo, será o elo fraco da estrutura. Dessa forma, tanto a litologia quanto a granulometria dos agregados pode influenciar a resistência final do concreto (AİTCIN e NEVILLE, 1993; AİTCIN, 2000).

Logo, com o incremento da resistência do concreto, através da otimização da pasta de cimento e zona de transição, o agregado passa a ter uma influência maior na limitação da resistência à compressão (AİTCIN e MEHTA, 1990; GONÇALVES et al., 1994, GIACCIO et al., 1992). Os agregados também exercem influência significativa em outras propriedades, como o módulo de deformação, a estabilidade dimensional e a massa específica do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2. 4. 2 Pasta de Cimento Hidratada

Segundo AİTCIN (2000), a pasta de cimento hidratada pode ser considerada como um material cristalino de uma única fase, onde os princípios fundamentais que governam o comportamento dos materiais frágeis, como a cerâmica, podem ser aplicados de forma conveniente para controlar a microestrutura e suas propriedades no concreto.

A composição química do cimento Portland é formada basicamente por quatro componentes principais:

- Silicato tricálcico (C_3S)
- Silicato dicálcico (C_2S)
- Aluminato tricálcico (C_3A)
- Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)

Quando o cimento é disperso na água, as reações químicas dão origem aos primeiros cristais aciculares de sulfoaluminato de cálcio hidratado, denominados de etringita. Em seguida ocorre a formação de cristais prismáticos de cálcio e pequenos cristais fibrilares de silicatos de cálcio hidratado preenchem os vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução. Posteriormente, a proporção de alumina-sulfato pode determinar a formação do monossulfato hidratado através da decomposição da etringita (NEVILLE, 1997).

A resistência da pasta de cimento hidratado é influenciada pelo teor de C_3S e C_2S , quando ocorre a formação do C-S-H, que representa na opinião de MEHTA e MONTEIRO (1994), 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada. Tal resistência é determinada pelas forças de atração de Van der Waals, onde o grau de ação aderente depende da extensão e natureza das superfícies envolvidas.

Os cristais de hidróxido de cálcio representam 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada e pouco contribuem para a resistência mecânica da mesma, pois possuem área específica consideravelmente menor que o C-S-H. Além disso, o aumento da quantidade de cristais de hidróxido de cálcio na pasta diminui a durabilidade do concreto aos ataques químicos de soluções ácidas, por apresentarem maior solubilidade em relação ao C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 1994). De acordo com PETRUCCI (1980), os cristais de hidróxido de cálcio são extremamente instáveis quimicamente e podem se dissolver na água absorvida da umidade presente no ar.

Já os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta endurecida, e pouco contribuem para as resistências finais. Além disso, a presença do

monossulfato hidratado torna o concreto vulnerável ao ataque por sulfatos, e a expansão devida à formação de sulfoaluminato de cálcio a partir do C_3A pode ocasionar a desagregação da pasta endurecida (NEVILLE, 1997).

Alguns grãos de clínquer não hidratado também podem estar presentes na mistura, o que dependerá da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação. O C_4AF presente é o composto de menor contribuição para a resistência da pasta de cimento hidratada (DAL MOLIN, 1995).

Segundo DAL MOLIN (1995), o incremento da resistência da pasta de cimento pode ser obtido através de:

- a) Aumento das proporções de silicato de cálcio na composição do cimento, principalmente do C_3S , que gera menor quantidade de hidróxido de cálcio – $Ca(OH)_2$;



- b) Diminuição da concentração de $Ca(OH)_2$ através da adição de material pozolânico, que o transforma em C-S-H adicional;
- c) Redução do espaço disponível para o crescimento dos cristais, que desenvolvem maiores forças de Van der Waals com o aumento da área específica. Ou seja, redução da proporção de água em relação às partículas de cimento anidro (redução da relação água/cimento);
- d) Redução das proporções de C_3A e C_4AF , o que não é possível devido a fatores econômicos.

A resistência da pasta de cimento hidratada não é influenciada somente por sua composição química. A resistência de vazios, poros e falhas têm uma considerável influência em suas propriedades (NEVILLE, 1997). Segundo NEVILLE e BROOKS (1987), a resistência da pasta depende principalmente da estrutura física dos produtos de hidratação e de suas proporções volumétricas. Estudos de MEHTA e AİTCIN (1990b) confirmam as conclusões apresentadas por NEVILLE e BROOKS (1987) ao relacionar a resistência da pasta hidratada e sua porosidade, além de apresentar as influências geradas pelo tamanho dos grãos e a heterogeneidade do sistema.

Portanto, a melhoria da resistência das pastas de cimento hidratado requer análise nos três níveis a seguir (NIELSEN, 1993):

2. 4. 2. 1 Porosidade

A hidratação dos compostos de silicatos anidros dá origem a diferentes produtos hidratados que preencherão o espaço originalmente ocupado pela água. Durante esse processo os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta entre as partículas de cimento são denominados de vazios e poros capilares.

Para NEVILLE (1997), os produtos da hidratação ocupam mais do que o dobro do volume da fase sólida inicial (cimento), e o volume do sistema capilar é reduzido com a evolução da hidratação. Sendo assim, a taxa da velocidade de hidratação do cimento não é significativa, contudo o tipo de cimento influenciará o grau de hidratação. Estudos de GLASSER (1992) apresentam pastas maduras de cimento formando um sistema interligado de capilares, principais responsáveis pela permeabilidade da pasta de cimento. Entretanto, a concentração de sólidos aumenta com o grau de hidratação e, conseqüentemente, os capilares podem ser bloqueados pelo gel e segmentados. A ausência de continuidade é devido a uma relação água/cimento adequada e um período de cura úmida suficientemente longo.

Por se cristalizarem fora, no espaço preenchido pela água que envolve as partículas, os produtos iniciais de hidratação são denominados “produtos externos”. Já os produtos das reações do estado sólido, formados dentro dos limites originais das partículas de cimento em hidratação, são chamados de “produtos internos”, e são mais compactos e cristalinos. A resistência da pasta é derivada principalmente das forças de atração de Van der Waals, portanto, quanto mais compactos e menos cristalinos forem os produtos da hidratação, maior será a resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O caminho de ruptura em uma pasta é através dos produtos externos e não dos internos. Logo, é de extrema importância para o incremento da resistência da pasta uma microestrutura similar à dos produtos internos, eliminando os externos (AÏTCIN, 2000).

DAL MOLIN (1995) relata a dificuldade em quantificar a porosidade da pasta de cimento endurecida, sendo necessário utilizar a relação água/cimento como parâmetro prático para a estimativa do volume total de vazios e poros capilares e, portanto, da resistência da pasta. A Figura 2. 1 apresenta a influência da relação água/cimento e da idade na porosidade e resistência à compressão das pastas, evidenciando a eficiência do aumento da resistência através da redução da relação água/cimento.

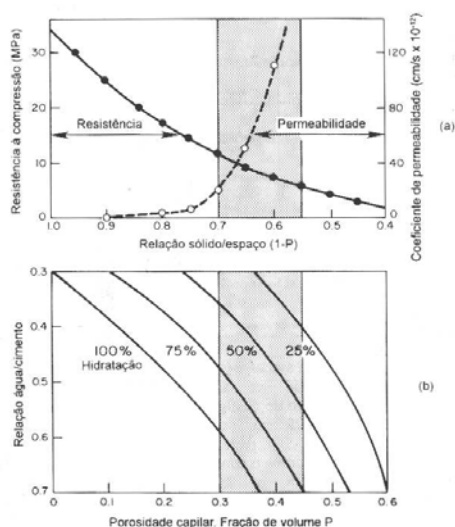


FIGURA 2. 1 – INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C E IDADE SOBRE RESISTÊNCIA E PERMEABILIDADE (MEHTA e MONTEIRO,1994)

Além dos vazios capilares, podem existir poros de ar e poros de gel, ou ainda espaço interlamelar no C-S-H. Este último apresenta tamanho muito pequeno para poder influenciar significativamente a resistência e permeabilidade da pasta, todavia, seus efeitos podem ser notados na retração por secagem e fluência. Já os poros de ar apresentam forma geralmente esférica e podem ser gerados por aditivos incorporadores de ar, ou o ar pode ser aprisionado na pasta durante o processo de mistura. Estes poros apresentam dimensões muito maiores que os vazios capilares e podem reduzir a resistência ao aumentar a permeabilidade da pasta (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A concentração de tensões e ruptura subsequente sob ação de cargas começa nos poros capilares de maiores dimensões e nas microfissuras presentes (AİTCIN, 2000).

A porosidade da fase do cimento hidratado é afetada principalmente pelas seguintes variáveis: relação do volume de água disponível, do volume da fase do silicato não hidratado e da quantidade de ar incorporado na mistura. Com base em tais parâmetros, FERÉT (apud AİTCIN, 2000) desenvolveu a seguinte expressão:

$$f'_c = k \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2$$

Onde:

f'_c = resistência à compressão da pasta de cimento;

w, c, a = volume de água, cimento e ar, respectivamente;

k = constante relacionada ao tipo de cimento.

Na pasta de cimento hidratada o volume do ar incorporado é usualmente inferior a 1 ou 2% do volume total, portanto, tal parcela pode ser desconsiderada, e a expressão escrita da seguinte forma:

$$f'_c = k \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{w}{c} \right) \right)^2}$$

É possível observar que a relação água/cimento deve ser reduzida quando se pretende elevar a resistência da mistura. A redução dessa relação permite uma aproximação maior das partículas de cimento. Conseqüentemente, diminui-se a porosidade capilar e os espaços livres para o desenvolvimento de produtos externos. Em pastas com baixa relação água/cimento, a água menos disponível torna-se saturada rapidamente por íons responsáveis pela formação de produtos externos. Nesse caso há uma aproximação das partículas de cimento, portanto, tais produtos têm uma distância menor a cobrir para o desenvolvimento de ligações iniciais entre as partículas de cimento. Além disso, o movimento da umidade torna-se lento, favorecendo a formação de produtos internos durante a hidratação.

Conclui-se que a redução efetiva da porosidade de uma pasta de cimento requer, tanto quanto possível, redução da quantidade de ar incorporado e da relação água/cimento o suficiente para permitir o manuseio adequado do concreto durante as operações de transporte e lançamento (AİTCIN, 2000).

2. 4. 2. 2 Diminuição do tamanho dos grãos dos produtos da hidratação

A redução da relação água/cimento favorece a formação de produtos internos caracterizados por uma textura fina. As pastas com relação água/cimento reduzida não contêm grandes pilhas de plaquetas hexagonais de óxido de cálcio, ou longas agulhas de etringita, ou ainda longos filamentos de C-S-H, característicos de misturas com elevada relação água/cimento (AİTCIN, 2000).

2. 4. 2. 3 Heterogeneidades

As heterogeneidades microestruturais, de acordo com AİTCIN (2000), em materiais multifase como o concreto, originarão perda de resistência. Portanto, é fundamental uma consolidação adequada do sistema.

2. 4. 3 Zona de Transição

A zona de transição, não obstante constituída dos mesmos elementos que a pasta de cimento, apresenta microestrutura que difere da matriz da pasta (SHAH, LI e LANGE, 1992). É caracterizada por uma pasta mais porosa com proporção elevada de cristais de hidróxido de cálcio e ruptura mais heterogênea em relação à matriz. Para PAULON (1991) a espessura da zona de transição é diretamente proporcional ao tamanho do agregado graúdo, e é influenciada pelo tamanho e forma das partículas de agregado miúdo. No concreto convencional, a espessura média está entre 0,05 a 0,1 mm, e é formada por poros de dimensões elevadas e grandes cristais dos produtos de hidratação, responsáveis pelas heterogeneidades estruturais que afetam a resistência do concreto (NEVILLE, 1997). MONTEIRO (1985) ainda afirma que tais diferenças estruturais decorrem dos efeitos de superfície produzidos pelo agregado, criando um filme de água que impede a distribuição homogênea da mesma no concreto fresco, formando locais com relação água/cimento mais elevada. A água que se acumula próxima ao agregado facilita a difusão dos íons e reduz as restrições geométricas da pasta de cimento, aumentando o espaço disponível para o desenvolvimento dos cristais. (PAULON, 1991).

As significativas diferenças microestruturais entre a pasta de cimento hidratada na zona de transição e na massa da pasta são de elevada importância na determinação das características de resistência do concreto através da teoria do elo mais fraco de Wei Bull. Essa teoria sugere que quando o concreto é submetido a uma determinada tensão, as fissuras se iniciam na zona de transição. A formação das fissuras está relacionada a diversos fatores, como a distribuição granulométrica e o tamanho do agregado, teor de cimento, relação água/cimento, entre outros. No concreto convencional, as tensões de tração induzidas pelas deformações na retração térmica e na secagem são elevadas o suficiente para causar o microfissuramento na zona de transição. Finalmente, a resistência à ruptura do elemento sob carga é controlada pela propagação e reunião de uma parte do sistema de microfissuras na pasta de cimento hidratada (AÏTCIN, 2000).

Conforme já discutido, a causa da adesão entre produtos de hidratação e partículas de agregado são as forças de atração de Van der Waals. Logo, a resistência é dependente do volume e das dimensões dos vazios presentes, que são maiores na zona de transição quando comparados à matriz de argamassa, mesmo em concretos de baixa relação água/cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Aliada à elevada porosidade e número de cristais orientados de hidróxido de cálcio, a zona de transição é considerada a parte mais fraca do material granular coesivo que constitui o concreto endurecido, o que foi provado por diversos pesquisadores (MONTEIRO, 1985; JENNINGS, 1988a; PAULON, 1991). Os cristais de hidróxido de cálcio de elevadas dimensões possuem menor capacidade de adesão, devido à sua menor superfície específica e conseqüentemente menos força de atração de Van der Waals e, além disso, servem como pontos de clivagem preferencial devido à estrutura orientada.

DAL MOLIN (1995) comparou a microestrutura de um concreto convencional e um concreto de alta resistência e concluiu que a zona de transição no concreto de alta resistência tem estrutura densa, onde as partículas de C-S-H estão intimamente próximas. Também é possível observar a presença de poucos poros capilares, além de pouca presença de hidróxido de cálcio. Já a zona de transição do concreto convencional apresenta um grande número de cristais de hidróxido de cálcio orientados, com planos de clivagem definidos, assim como uma porosidade elevada. Dessa forma, a interface é enfraquecida a tal ponto que se torna o elo fraco e fator limitante da resistência do material.

Conclui-se, dessa forma, que o aumento da resistência pode ser realizado através de mudanças nas características da zona de transição. Isto pode ser realizado através da dosagem adequada dos materiais, de forma a reduzir a quantidade de água retida pelos agregados paralela à redução de suas partículas, redução da relação água/cimento. Além disso, deve ser realizado um adensamento adequado que diminua ou evite a exsudação, e a utilização de aditivos e adições ao concreto que contribuam para o proporcionamento ideal de materiais à mistura (AÏTCIN, 2000).

2. 4. 4 Seleção dos Materiais

A escolha dos materiais a serem utilizados na produção de concretos de alta resistência requer um cuidado distinto para cada um de seus constituintes. O desempenho e a qualidade de cada material são cruciais ao elevar-se a resistência. Entretanto, alguns desses exercem maior influência sobre os aspectos econômicos do concreto de alta resistência (AİTCIN, 2000). Tais constituintes determinam a competitividade do concreto de alta resistência frente a outros materiais estruturais como o aço, ou mesmo o concreto convencional.

A dificuldade para seleção dos materiais utilizados na produção de concretos de alta resistência repousa no fato de existirem diversas variações de composição e propriedades dos cimentos e agregados. Outro motivo para MEHTA e AİTCIN (1990b) é a inexistência de uma diretriz para os tipos de cimento e agregado mais adequados ao uso em concretos de alta resistência. Não bastassem as variações de materiais, diversos aditivos e adições são simultaneamente empregados na produção do concreto de alta resistência, não existindo regras simples para a escolha dos materiais mais adequados.

AİTCIN (2000) define a seleção dos materiais e a otimização do concreto de alta resistência como “mais uma arte do que uma ciência”. Isto demonstra a complexidade desse processo. De qualquer forma, algumas propriedades e características dos constituintes, de maneira geral, afetam benéficamente o comportamento das misturas e permitem a otimização das propriedades mecânicas do concreto endurecido. Serão apresentadas a seguir algumas considerações em relação aos materiais utilizados na produção de concreto de alta resistência.

A seleção dos materiais tem dois objetivos fundamentais: o máximo rendimento de todos os componentes da mistura para alcançar a maior resistência ao menor custo e consistência adequada através de materiais que demandem o menor consumo de água possível.

2. 4. 4. 1 Cimento

De acordo com HOWARD e LEATHAM (1989), não há critério científico para especificação do cimento mais adequado na produção de concreto de alta resistência. O melhor cimento será aquele que apresentar menor variabilidade em termos de resistência à compressão, segundo o comitê 363 do ACI (1991).

Para MEHTA e AİTCIN (1990a), a produção de concreto de alta resistência pode ser realizada utilizando qualquer tipo de cimento. Embora seja preferível o uso de materiais com elevados teores de C_3S e C_2S em sua composição.

GJORV (1992) ressalta a importância da necessidade de água e trabalhabilidade da mistura, onde os parâmetros de controle são a granulometria do cimento e a proporção de C_3A .

Segundo AİTCIN (2000), é possível produzir concretos com resistência à compressão axial até 50 MPa com quaisquer tipos de cimento, entretanto, muitos deles não podem ser utilizados à medida em que a resistência é aumentada. O fato é que a primeira escolha a ser realizada quando se pretende produzir concreto de alta resistência é a do cimento, mesmo quando outros materiais cimentícios suplementares forem utilizados. Isto porque o desempenho do cimento, em termos de reologia e resistência, torna-se um item cada vez mais crítico, proporcional ao aumento da resistência à compressão.

A revisão das propriedades relevantes dos materiais constituintes do concreto de alta resistência permite observar que a fase silicato representa um papel fundamental no desenvolvimento da resistência. Já a fase intersticial influencia as características reológicas dos traços com relação água/aglomerante muito baixa. Sendo assim, o desempenho final do cimento na produção do concreto de alta resistência será determinado através da maneira pela qual o comportamento reológico e o desenvolvimento da resistência podem ser simultaneamente otimizados (AİTCIN, 2000).

Sendo a reologia de um determinado cimento influenciada pelo controle de C_3A através da formação de etringita, quanto mais cúbico for o C_3A desse cimento, mais fácil será controlá-la (VERNET e NOWORYTA apud AİTCIN, 2000). O objetivo de obter-se um clínquer com o C_3A cúbico resulta que a maioria dos álcalis deve ser combinada na forma de sulfatos de álcalis na zona de clínquerização, tornando o grau de sulfatação de um clínquer parâmetro fundamental no controle da reologia de um determinado cimento a ser utilizado na produção de concreto de alta resistência.

De qualquer forma, na opinião de MEHTA e AİTCIN (1990b), quanto menor o teor de C_3A do cimento, maior o controle da reologia do material. Portanto, para a produção de concreto de alta resistência deve ser utilizado um cimento com o menor teor possível de C_3A , além de conter certa quantidade de sulfatos solúveis, não apenas a quantidade adequada de SO_3 , com o objetivo de controlar rápida e eficientemente a formação da etringita. Em relação à resistência, esse material deve ser finamente moído e conter uma quantidade adequada de C_3S .

Quanto à compatibilidade entre cimento e aditivos incorporados ao sistema, é importante considerar-se a compatibilidade química, influenciada pelas composições químicas do cimento e do aditivo. Em geral, quanto maior a finura do cimento, menor será a eficiência do aditivo devido à diminuição da concentração específica das moléculas adsorvidas na superfície dos grãos de cimento (BUCHER, 1988).

A composição química do cimento influenciará o comportamento da mistura em relação à consistência inicial e a perda de abatimento com o tempo. COLLEPARDI (1984) atribui as diferenças de comportamento ao conteúdo de C_3A , gesso e álcalis, assim como à forma do sulfato de cálcio utilizado como regulador de pega do cimento. Segundo o autor, quanto maior o conteúdo de álcalis, maior a velocidade das reações e, conseqüentemente, maior a perda de resistência. Da mesma forma, a presença de superplastificante acelera as reações entre o C_3A e o gesso. Cimentos contendo maior quantidade de aluminato tricálcico C_3A , perdem mais rapidamente a consistência inicial na presença de superplastificantes (ACI 212, 2001).

O consumo de cimento no concreto influencia a taxa de perda de abatimento com o tempo, que é menor quanto mais elevado for o consumo (MAILVAGANAM, 1979). A consistência inicial também é influenciada pelo consumo de cimento. ALAEJOS e CÁNOVAS (1992) comentam que em casos onde a produção de concretos requer utilização de relações água/cimento muito baixas e a água de amassamento é insuficiente para permitir que se atinja a trabalhabilidade desejada, pode ser necessário aumentar o consumo de cimento além do ideal, para assim elevar-se o teor água e manter-se a mesma relação água/cimento. Entretanto, além dos problemas econômicos, pois o custo da estrutura aumenta, a elevação do consumo de cimento pode gerar fissuração, causada pela retração do concreto e elevada liberação de calor durante a hidratação do cimento.

Durante a hidratação, o cimento libera grande quantidade de calor, influenciando a pega e o endurecimento do concreto. O calor de hidratação depende da sua composição química, cimentos com elevado teor de C_2S apresentam baixa liberação de calor e conseqüente endurecimento lento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Quanto à finura do cimento, a dimensão das partículas determina a velocidade da reação de hidratação. Segundo NAWA et al. (1991), quanto maior a superfície específica das partículas, mais fase silicato entrará em contato com a água e mais reativo será o cimento, desenvolvendo C-S-H com maior velocidade na superfície das fases silicato.

2. 4. 4. 2 Agregados

As propriedades do concreto são influenciadas enormemente pela qualidade dos agregados utilizados em sua produção, visto que aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume de concreto, de acordo com GJORV (1994), é ocupado pelos agregados. A seleção desses materiais deve ser cuidadosamente realizada, pois com o aumento da resistência à compressão projetada a qualidade dos agregados será o fator limitante para obtenção de trabalhabilidade e alta resistência. Sendo assim, a ruptura será iniciada sob uma alta tensão, sendo a fase esqueleto granular o elo fraco da corrente na mistura (AİTCIN e NEVILLE, 1993).

2. 4. 4. 2. 1. Agregado Graúdo

a) Dimensão Máxima Característica (DMC): A dimensão máxima característica dos agregados graúdos utilizados na produção de concretos de alta resistência é cercada por diversas controvérsias. De acordo com GJORV (1992), a DMC mais adequada para a produção de concreto de alta resistência é a faixa entre 10 a 14 mm, assim como para ALAEJOS e CÀNOVAS (1992). Entretanto, outros pesquisadores apontam como limite máximo utilizado com sucesso, valores iguais a 19 mm (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ACI 363, 1991) ou até 25 mm (ACI 363, 1991; FIP/CEB, 1990). Já DE LARRARD e BELLOC (1992) apresentaram resultados experimentais com concretos de alta resistência produzidos utilizando agregados de DMC igual a 20 mm e resistência à compressão de até 122 MPa.

De qualquer forma, é recomendável a utilização de agregados com menor DMC para a produção de um concreto de alta resistência. Pois, segundo JENNINGS (1988a), o processo de diminuição da dimensão dos agregados pode gerar falhas microestruturais, com probabilidade maior de remanescerem em agregados de maiores dimensões. Além disso, a maior área superficial de contato pasta/agregado gera maior superfície de aderência do agregado à pasta. Finalmente, quanto menor a dimensão do agregado, menor será sua superfície capaz de reter água durante a exsudação do concreto fresco, diminuindo a espessura da zona de transição e, conseqüentemente, aumentando a resistência do concreto (PAULON, 1991; AİTCIN, 2000).

b) Granulometria: Segundo DAL MOLIN (1995), a distribuição granulométrica altera a demanda de água da mistura, e conseqüentemente, a trabalhabilidade do concreto. Para a produção de concretos de alta resistência, um dos parâmetros mais importantes é a baixa relação água/aglomerante. Logo, a necessidade de água solicitada pela mistura deve ser a menor possível.

De acordo com ALVES (2000), agregados de granulometria contínua, com ausência de deficiência ou excesso de qualquer fração do agregado, geram um empacotamento mais adequado dos grãos, podendo alterar as frações volumétricas do

agregado, diminuindo-se a quantidade de pasta necessária e o consumo de cimento. A fração volumétrica está relacionada ao módulo de deformação do concreto.

c) Propriedades elásticas: Ao contrário dos concretos convencionais, os concretos de alta resistência podem apresentar um comportamento de um material compósito com uma transferência demasiadamente eficiente de tensões entre os agregados e a pasta (BAALBAKI et al., 1991). Nesses casos, a zona de transição é tão forte que as propriedades elásticas do agregado assumem um papel extremamente importante no desempenho mecânico do concreto de alta resistência.

Um método de avaliação do potencial de utilização do agregado em concreto de alta resistência baseado nas propriedades elásticas dos materiais foi desenvolvido por AÏTCIN e MEHTA (1990), e consiste na análise da forma da curva de histerese durante o ensaio do módulo de deformação do concreto. Neste ensaio, curvas largas de histerese indicam fragilidade na zona de transição ou nas partículas de agregado; curvas estreitas e deformações residuais nulas ou quase nulas são indicações de agregados resistentes e sem defeitos internos com possibilidade de formar zonas de transição mais fortes.

d) Resistência: Conforme já discutido, no concreto de alta resistência a pasta de cimento hidratada e a zona de transição podem ser tão resistentes que, caso os agregados não sejam suficientemente resistentes, tornar-se-ão o fator limitante da capacidade resistente de todo o sistema.

e) Forma e textura superficial: A aderência entre o agregado e a pasta de cimento exerce influência significativa na resistência do concreto. Portanto, a forma e a textura superficial são parâmetros relevantes no comportamento mecânico da mistura.

Segundo JENNINGS (1988a), agregados angulares como a pedra britada, proporcionam resistências mais elevadas que partículas arredondadas e lisas. Todavia, de acordo com o comitê 363 do ACI (1991), agregados angulares podem aumentar o consumo de água da mistura e reduzir a trabalhabilidade, caso a angulosidade seja muito acentuada. Já as partículas lamelares devem ser evitadas, pois são frágeis e, além disso, são ásperas e produzem misturas que requerem maiores teores de água e aditivos.

2. 4. 4. 2. 2. Agregado Miúdo

A produção de concreto de alta resistência requer uma quantidade de água muito baixa devido à sua influência sobre a resistência. É necessária uma seleção adequada dos agregados miúdos, pois tais materiais estão diretamente relacionados ao consumo de água na mistura (AİTCIN, 2000).

Os agregados miúdos utilizados devem estar livres de impurezas orgânicas, argila ou outros materiais deletérios e não apresentar quantidade excessiva de finos (NAWY, 1996). A quantidade de partículas finas em concreto de alta resistência é normalmente alta devido ao alto teor de cimento e materiais cimentícios, portanto, não existe a necessidade da utilização de uma areia fina do ponto de vista da trabalhabilidade e segregação. Além disso, a utilização de uma areia mais grossa é recomendada (módulo de finura maior) ao possuir menor superfície específica e gerar um pequeno decréscimo na quantidade de água da mistura necessária para atingir determinada trabalhabilidade (AİTCIN, 2000; PETERMAN e CARRASQUILLO, 1986; HOWARD e LEATHAM 1989; ACI 363, 1991; GJORV, 1992; entre outros).

2. 4. 4. 3 Água

Segundo NEVILLE (2000), a água não é apenas um líquido usado na produção de concreto, porém envolve todo o desempenho desse material. Para a produção de concreto de alta resistência os requisitos de qualidade estabelecidos para a água são os mesmos exigidos na produção de concreto convencional.

2. 4. 4. 4 Adições Minerais

As adições minerais são, em sua grande parte, provenientes de subprodutos industriais que podem formar uma grande variedade de sistemas cimentícios. O emprego no concreto é apoiado no fato de propiciarem aumento da resistência e durabilidade ao influenciar a porosidade e permeabilidade do sistema, além de diminuição do consumo de energia e conseqüente conservação dos recursos naturais (PHELAN, 2000).

A resistência do concreto nas primeiras idades pode ser aumentada devido a uma pequena aceleração na hidratação do cimento Portland gerada pelas adições minerais. Já o ganho de resistência nas idades finais é devido principalmente à reação pozolânica que resulta em refinamento dos poros e substituição do hidróxido de cálcio por um constituinte mais forte, o silicato de cálcio hidratado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com DAL MOLIN (1995), as adições pozolânicas são mais efetivas no aumento da resistência, pois, além do efeito químico, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição. O emprego deste material pode aumentar o custo da mistura, portanto o seu uso deve ser baseado em argumentos além dos econômicos (AÏTCIN e NEVILLE, 1993). Os principais materiais cimentícios utilizados na produção de concreto de alta resistência são: a sílica ativa, a cinza volante, a escória de alto-forno e as argilas calcinadas (metacaulim). Suas vantagens e principais características serão descritas a seguir:

a) Sílica ativa: A utilização da sílica ativa gera efeitos benéficos na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto devido ao efeito químico causado pelas reações pozolânicas produzidas e o efeito físico, chamado de efeito filer, ocasionado pela finura elevada do material. Este material é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício, dentre outras ligas de silício (AÏTCIN, 2000).

O efeito químico (pozolânico) é gerado pelas reações químicas entre a sílica e os cristais de hidróxido de cálcio formados durante a reação de hidratação do cimento. Tais cristais ao reagirem com a sílica ativa formam silicatos de cálcio hidratados, contribuindo para o aumento da resistência consideravelmente (ALVES, 2000).

Já o efeito filer consiste no preenchimento dos vazios entre as partículas de agregado e produtos de hidratação do cimento pelas minúsculas partículas de sílica ativa, que poderiam ser preenchidos por água ou mesmo pelo ar. O tamanho reduzido de tais partículas diminui a exsudação interna e superficial da mistura, gerando zonas de transição com porosidade reduzida em comparação a concretos sem adições (AÏTCIN, 2000).

Devido à elevada superfície específica, a sílica ativa apresenta enorme capacidade de absorção e, conseqüentemente, maior demanda de água no concreto. NAWY (1996) comenta que para teores de adição de 16% em relação ao peso de cimento, o aumento da demanda de água pode chegar a 40%. Portanto, é indispensável a utilização de aditivos redutores de água.

O teor de sílica ativa comumente utilizado na produção de concreto varia entre 5 a 10% do peso do cimento, proporcionando incrementos de até 30% na resistência do mesmo. De acordo com ALAEJOS e CÁNOVAS (1992), o teor pode ser estendido para 15 a 20%, aumentando ainda mais os valores da resistência, assim como o custo do produto final. Todavia, AİTCIN (2000) discorda ao comentar que os ganhos de resistência não são muito significativos para valores acima dos 10% sobre a massa de cimento. Além do custo da sílica adicional, deverá ser empregado um teor maior de aditivo superplastificante para dispersá-la, portanto o retorno em termos de \$/MPa é cada vez menor e menos atrativo.

b) Cinza volante: Este material é constituído pela cinza obtida através da precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão durante a combustão do carvão pulverizado (NEVILLE, 1997). Segundo AİTCIN (2000), existem diversos tipos de cinzas volantes, entretanto, a ASTM as classifica em duas categorias relacionadas à sua composição química: Classe F (baixo teor de cálcio) e Classe C (alto teor de cálcio).

A utilização da cinza volante na produção do concreto é justificada pela ação pozolânica, porém, com efeitos menores aos da sílica ativa. O seu efeito pozolânico gera aumento da resistência do concreto em idades mais avançadas (AİTCIN e NEVILLE, 1993). De acordo com ALAEJOS e CÁNOVAS (1992), o teor ideal de utilização desse material está entre 15 a 25% em relação ao peso de cimento. Todavia, dosagens tão baixas como 10% e tão altas como 30% também são registradas (MEHTA e AİTCIN, 1990; MALHOTRA, 2002). Os referidos autores concluem que quanto mais alta for a resistência pretendida, mais baixa será a dosagem, pois este material não é tão reativo como a sílica ativa em traços de alta resistência.

c) Escória de alto-forno: O subproduto da manufatura do ferro-gusa em alto-forno constitui essa adição mineral. Atualmente, a utilização da escória de alto-forno está limitada à produção de concretos de até 125 MPa, juntamente com a adição de sílica ativa. Espera-se que seu uso se estenda a concretos com resistências superiores através do desenvolvimento de novas pesquisas (AİTCIN, 2000).

A escória de alto-forno possui um caráter mineralógico e reatividade semelhante à cinza volante com alto teor de cálcio. Quando comparada à cinza volante de baixo teor de cálcio, que normalmente não apresenta contribuição para a resistência até cerca de quatro semanas de hidratação, a contribuição da escória de alto-forno e da cinza volante de alto teor de cálcio é notada já aos 7 dias de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Em relação ao teor utilizado, a literatura apresenta aplicações que variam de 15 a 30% e que são influenciadas pelas condições climáticas (AİTCIN, 2000).

d) Argilas Calcinadas: A utilização da argila calcinada em concreto, de acordo com BARATA (1998), diminui a exsudação, pois as partículas finas desse material, assim como a sílica ativa, proporcionam um empacotamento mais adequado dos grãos, reduzindo dessa forma os canais ascendentes de água. Já a resistência do concreto apresenta comportamentos distintos, influenciados pelas características físicas e composição mineral do tipo de material empregado. Segundo o referido autor, quando a adição for extremamente fina e constituída basicamente por caulinita termicamente ativada, a taxa de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades é alta, o que resulta em uma elevada liberação de calor. Sendo assim, esse material está associado à produção de concretos de alta resistência inicial e alto desempenho, e os teores comumente utilizados variam entre 10 a 20%. Porém, se o material apresentar teor elevado de fases pozolanicamente inertes como o quartzo e a mica, e granulometria não tão fina, as reações pozolânicas serão mais lentas e, conseqüentemente, a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência serão mais baixas. Devido a tais características esses materiais são geralmente aplicados em estruturas de concreto-massa.

2. 4. 4. 5 Aditivos Superplastificantes

A justificativa para o uso dos aditivos na produção de concreto está no fato de que esse material tem como função principal a mudança das propriedades do concreto, tornando-o mais adequado ao manuseio, gerando economia e reduzindo o gasto energético (NAWY, 1996). A utilização desse material engloba três diferentes propósitos:

- Aumentar a trabalhabilidade sem mudar qualquer componente da mistura;
- Reduzir a demanda de água, diminuindo dessa forma a relação água/cimento e aumentando a resistência e durabilidade da mistura;
- Reduzir o consumo de água e cimento e, por conseguinte, o calor de hidratação responsável pela formação de fissuras, retração e tensões térmicas.

Os aditivos superplastificantes foram inicialmente classificados em quatro categorias distintas, em função de sua composição química (CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, 1978; MALHOTRA, 1984; RIXON e MAILVAGANAM, 1986):

- condensados de formaldeído melanina sulfonados (SMF);
- condensados de formaldeído naftaleno sulfonados (SNF);
- lignossulfatos modificados (MLS);
- copolímeros.

Entretanto, atualmente existe uma nova categoria constituída pelos superplastificantes à base de policarboxilatos. Em sua maioria, os estudos sobre aditivos superplastificantes estiveram voltados aos produtos à base de melanina sulfonada ou naftaleno sulfonado (RAMACHANDRAN, 1983; COLLEPARDI, 1994; HEWLET e RIXON, 1992; apud DAL MOLIN, 1995). Para BUCHER (1988) este fato justifica-se pelo desempenho de tais materiais, que se caracterizam por possuírem grande eficiência como redutores de água, além de mínimas ações secundárias ou efeitos colaterais indesejáveis.

COLLEPARDI et al. (1999) define o desenvolvimento dos aditivos superplastificantes como um dos principais passos na produção e desenvolvimento de concretos de alta resistência, pois esses materiais atuam no concreto dispersando as partículas de cimento que tendem a flocular quando em contato com a água de amassamento. Na opinião de DAL MOLIN (1995), a obtenção de concreto de alta resistência está vinculada à utilização de aditivos superplastificantes, pois para aumentar a resistência de um determinado concreto é possível reduzir-se a relação água/cimento das seguintes formas:

- a) redução da quantidade de água de amassamento, que pode gerar perda de trabalhabilidade e, conseqüentemente, dificuldades com manuseio (lançamento e adensamento) e queda no desempenho mecânico;
- b) aumento do consumo de cimento, que resulta em custo maior, excesso de finos e maior calor de hidratação liberado, gerando maiores retrações, fissuras, fluência, entre outros;
- c) utilização de aditivos redutores de água, que podem proporcionar incrementos na resistência quando os teores forem determinados adequadamente.

O desempenho dos aditivos é função de diversas variáveis, como sua natureza e quantidade empregada, composição e superfície específica do cimento, natureza e proporcionamento dos agregados, compatibilidade entre materiais e adições, relação água/cimento, condições de cura, entre diversos outros (MAILVAGANAM, 1999).

Quando utilizados em concreto de alta resistência, vários aspectos dos aditivos superplastificantes devem ser considerados com relação aos efeitos gerados sobre a mistura em estado fresco ou endurecido. No estado fresco, os principais aspectos que podem ser influenciados são:

- a) Consistência: os aditivos superplastificantes alteram a consistência do concreto ao reduzir o consumo de água da mistura. Deve ser tomado cuidado devido à taxa relativamente alta de perda de consistência e trabalhabilidade com o tempo, efeito relacionado à formação de sulfoaluminato de cálcio hidratado, ou etringita, que precipita

incorporando um grande volume de água livre, resultando na reversão da consistência original. Alguns dos fatores que influenciam este fenômeno são: tipo de aditivo e cimento, dosagem, temperatura, umidade, consistência inicial do concreto, momento de colocação do aditivo na mistura, procedimentos de mistura, compatibilidade com outros aditivos presentes no sistema, entre outros (MAILVAGANAM, 1979; 1999).

b) Exsudação e segregação: RAMACHANDRAN e MALHOTRA (1984) afirmam que a utilização de aditivo superplastificante como redutor de água em concretos de alta resistência inibe a ocorrência de segregação ou exsudação. Entretanto, para YAMAMOTO e KOBAYASHI (1986), quando o tempo de início de pega do concreto é retardado devido a baixas temperaturas ou altas dosagens de aditivos retardadores de pega, pode haver aumento considerável na água exsudada.

Para o concreto no estado endurecido não há mudança significativa na morfologia das pastas de cimento hidratado com superplastificante, embora se saiba que ocorra a formação de uma estrutura mais densa através da presença de partículas menores de cimento hidratado conforme já discutido (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984).

A redução do consumo de água provocada pela utilização do superplastificante proporciona melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto devido à diminuição da porosidade. Segundo HEWLETT e RIXOM (1977), reduzindo-se o teor de água em 25 a 35% é possível obter aumento de 50 a 75% da resistência à compressão para idade de um dia de hidratação. Tal efeito dos superplastificantes na resistência das primeiras idades é comprovado em diversos outros trabalhos (GIAMUSSO, 1988; ACI 212, 2001; AİTCIN, 2000) que justificam a melhoria das propriedades mecânicas nas primeiras idades ao fato do superplastificante aumentar a área de contato entre a água e as partículas de cimento.

Em relação a concretos de referência, a fissuração e fluência de concretos com superplastificantes não apresentam diferenças (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1984). Segundo estudos de diversos autores, a adição do superplastificante, quando mantida a mesma relação água/cimento, não altera a retração, permeabilidade, resistência

aos ataques químicos, resistência mecânica ou módulo de deformação (PERENCHIO, 1979; MALHOTRA e MALANKA, 1979; MALHOTRA, 1989; YAMAMOTO e KOBAYASHI, 1986; entre outros).

De acordo com DAL MOLIN (1995), as diversas opiniões relacionadas à influência dos superplastificantes nas propriedades do concreto endurecido ocorrem, dentre outras razões, devido às diferentes características dos materiais (aditivo, cimento, adições), dosagens e metodologias dos experimentos e ensaios.

O teor de aditivo superplastificante comumente utilizado varia de 0,8 a 2,0% de sólidos sob a massa de material cimentante, sendo a parte sólida do aditivo em torno de 30 a 40% geralmente (MEHTA e AİTCIN, 1990b).

2. 4. 5 Propriedades do Concreto

2. 4. 5. 1 Propriedades do Concreto de Alta Resistência no Estado Fresco

As propriedades do concreto de alta resistência no estado fresco devem ser controladas, segundo AİTCIN (2000), devido a duas razões principais. Primeiramente, o concreto de alta resistência, assim como o convencional, deve ser lançado facilmente. Portanto a primeira razão está relacionada à trabalhabilidade da mistura. A segunda razão correlaciona as propriedades do concreto endurecido ao controle no estado fresco, ou seja, o controle enquanto fresco resultará num concreto endurecido com propriedades controladas.

Enquanto fresco, os principais problemas que podem surgir são: perda de abatimento, retardamento de pega, que atrasará o desenvolvimento da resistência, e segregação elevada da mistura. Tais problemas ocorrem por diversos fatores que podem ser drasticamente reduzidos quando algumas propriedades forem controladas, como a massa específica, o abatimento, a trabalhabilidade e o teor de ar incorporado (ALVES, 2000).

a) Massa específica: corresponde à massa de uma unidade de volume do concreto fresco adensado de acordo com a normalização brasileira, considerando o volume de ar aprisionado ou incorporado (NBR NM 47/2002).

Em relação ao concreto usual, a massa específica do concreto de alta resistência é um pouco maior, quando utilizados os mesmos materiais. Para o concreto de alta resistência esses valores estão entre 2400 kg/m^3 para traços com ar incorporado e 2500 kg/m^3 para traços sem ar incorporado, e a obtenção desses valores através de ensaios elimina a necessidade de medições freqüentes do teor de ar, que tomam mais tempo, pois quando tais valores permanecem constantes o teor de ar também é constante. Dessa forma, a medida da massa específica, quando utilizada em conjunto com outros ensaios de determinação das propriedades do concreto, permite a confirmação de modificações no concreto fresco e a obtenção de um diagnóstico rápido do problema (AİTCIN, 2000).

b) Trabalhabilidade: definida pela ASTM C125 (1993) como a propriedade que determina o esforço necessário para a manipulação de uma quantidade determinada de concreto no estado fresco com perda mínima de homogeneidade. A trabalhabilidade é composta por dois fatores principais: a fluidez (facilidade de mobilidade) e a coesão (resistência à exsudação e segregação).

O esforço necessário para o lançamento do concreto, de acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), é determinado principalmente pelo esforço para o início e manutenção do fluxo, dependendo assim das características reológicas do cimento e do atrito entre as partículas do agregado e entre o concreto e a fôrma. Já o esforço necessário ao adensamento é influenciado pela facilidade de eliminação dos vazios sem perda de trabalhabilidade, que é um índice simultâneo de capacidade de retenção da água (oposto de exsudação) e retenção do agregado gráúdo na massa de concreto fresco (oposto de segregação).

Diversos são os fatores que afetam a trabalhabilidade do concreto fresco, contudo, podem ser agrupados em duas categorias principais: fatores relacionados ao esqueleto dos agregados, e fatores relacionados ao comportamento da pasta de cimento hidratada.

Os principais fatores relacionados ao esqueleto dos agregados que afetam a trabalhabilidade são a quantidade total de agregado na mistura, as proporções relativas entre agregado graúdo e miúdo, assim como a respectiva granulometria e a forma das partículas.

A relação água/cimento é um dos principais fatores que determinam o comportamento reológico da pasta de cimento, principalmente no concreto convencional. Quando a relação água/cimento é alta, as partículas de cimento e material cimentício estão afastadas, logo, suas interações durante a hidratação não afetam a trabalhabilidade significativamente. À medida que essa distância é reduzida, com a redução da relação água/cimento, a água, antes o fator principal na reologia da pasta de cimento, não desempenha mais o papel chave (NEVILLE, 2000). Nesse caso, o cimento e as partículas cimentícias interagem fisicamente (AİTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994; HUYNTH, 1996). Dessa forma, o superplastificante irá interagir com as partículas de cimento em hidratação, criando um sistema mais complexo de parâmetros que influenciam a reologia e trabalhabilidade do concreto de alta resistência. Segundo TAGNIT-HAMOU e AİTCIN (1993), o teor de sulfato do cimento e a sua velocidade de dissolução são muito importantes e influenciam a trabalhabilidade em concretos de alta resistência.

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), em condições normais, o volume dos produtos de hidratação é pequeno durante a primeira meia hora após a adição da água ao cimento, e a perda de abatimento é mínima. Após esse período inicial o concreto começa a perder abatimento a uma taxa que é função da hidratação, temperatura, composição do cimento e aditivos presentes.

A utilização dos aditivos superplastificantes no concreto de alta resistência resulta em diversos problemas de incompatibilidade, que são acentuados na medida em que se diminui a relação água/cimento à procura de resistências cada vez mais altas (AİTCIN e NEVILLE, 1993). Algumas vezes tais aditivos são descartados não por criarem

dificuldades em atingir a resistência pré-estipulada, mas por gerarem problemas de elevada perda de abatimento com o tempo (MAILVAGANAM, 1999).

AİTCIN (2000) ainda comenta que do ponto de vista prático podem ser adicionados materiais cimentícios suplementares em substituição à parte do cimento, ou alguma incorporação de ar, que poderá contribuir para a trabalhabilidade, mesmo que resulte em perda de resistência. Segundo o autor, foi possível produzir um concreto com resistência à compressão aos 91 dias igual a 100 MPa e teor de ar incorporado de 4,5%. Portanto, futuramente, a incorporação de ar deverá ser utilizada freqüentemente para melhoria da trabalhabilidade em misturas com relação água/cimento muito baixa.

c) ar incorporado: o teor de ar incorporado pode influenciar a resistência do concreto ao determinar sua porosidade. Em concretos de alta resistência sem ar incorporado não é essencial determinar freqüentemente o teor de ar incorporado, mas é recomendável que seja feita a medição conjunta com a verificação da massa unitária de tempos em tempos (AİTCIN, 2000).

Concretos de alta resistência geralmente apresentam teores entre 1 a 3% de ar aprisionado, valores que aumentam à medida em que a relação água/cimento é reduzida. Dessa forma, quando a resistência é a propriedade principal estipulada para o concreto de alta resistência sem ar incorporado, deve-se manter a quantidade de ar aprisionado tão baixa quanto possível para evitar qualquer perda dessa propriedade. Já em concretos de alta resistência com ar incorporado é possível obter teores na faixa de 4 a 5 % de ar, melhorando consideravelmente a trabalhabilidade da mistura, seu lançamento, adensamento e acabamento. Nesses casos, quando a resistência não é um ponto crítico, a redução da mesma é compensada pela melhoria da trabalhabilidade (AİTCIN, 2000).

2. 4. 5. 2 Propriedades do Concreto de Alta Resistência no Estado Endurecido

Diversas são as propriedades mecânicas do concreto influenciadas pelo aumento da resistência, contudo serão discutidas apenas aquelas relacionadas ao programa experimental do estudo em questão.

2. 4. 5. 2. 1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a principal propriedade mecânica do concreto, pois além de estar relacionada à estrutura interna do material, proporcionando uma estimativa do desempenho do concreto, indica de forma indireta sua durabilidade (DAL MOLIN, 1995). Esta propriedade aumenta de forma inversamente proporcional à relação água/cimento, entretanto, a diferença em relação ao concreto convencional está no fato de que esta lei é válida até ser atingida a resistência de ruptura do agregado graúdo. Nesse caso, quando esse material não é resistente o suficiente, em comparação à resistência da pasta de cimento hidratado, torna-se o elo fraco da estrutura, e a resistência à compressão do concreto não aumentará significativamente com a diminuição da relação água/cimento (AİTCIN, 2000). Tal redução pode ser realizada diminuindo-se o consumo de água através da utilização de aditivo superplastificante, ou ainda aumentando o consumo de aglomerantes, possibilitando controle sobre a resistência inicial de determinado concreto de alta resistência quando se projeta a sua composição (ROUGERON e AİTCIN, 1994).

Segundo DAL MOLIN (1995), um aspecto importante na tecnologia do concreto é a evolução da resistência com a idade. AİTCIN (2000) comenta que duas a três horas adicionais de cura a 20°C podem fazer uma grande diferença na resistência à compressão inicial do concreto de alta resistência. Para CARRASQUILLO (1981), a velocidade de evolução da resistência em concretos sem adições minerais é maior em concretos de alta resistência nas primeiras idades.

A velocidade maior da taxa de desenvolvimento da resistência em concretos de alta resistência é atribuída, na opinião de DE LARRARD e MALIER (1992) à proximidade inicial das partículas de cimento do concreto fresco devido à baixa relação água/cimento da mistura. O comitê 363 do ACI justifica esse comportamento ao calor de hidratação gerado devido ao elevado consumo de cimento na produção de concretos de alta resistência.

Uma equação para previsão da resistência do concreto de alta resistência (acima de 50 MPa), até os 28 dias de idade, é apresentada nas normas francesas BAEL e BPEL (apud FOURÉ e TRINH, 1988) e transcrita a seguir:

$$f_{cj} = \frac{j}{1,40 + 0,95j} f_{c28}$$

Onde:

j = idade, em dias;

f_{cj} = resistência à compressão, em MPa, aos *j* dias de idade;

f_{c28} = resistência à compressão, em MPa, aos 28 dias de idade.

As condições de cura também podem gerar variações na resistência à compressão do concreto. MALHOTRA et al. (1990) constatou que a resistência à compressão de concretos com 182 e 365 dias submetidos à cura úmida, era maior que para os mesmos traços submetidos à cura ao ar, e que tal diferença diminui ao adicionar-se sílica ativa.

Foi constatado por DE LARRARD (apud AİTCIN, 2000) um pequeno decréscimo da resistência em corpos de prova de concretos com sílica ativa após um longo período de cura ao ar. Tal perda de resistência é mencionada na literatura como “regressão da resistência”, e ocorre ocasionalmente quando o concreto é exposto a condições severas de secagem ao ar. Portanto, os autores apontam para a necessidade de cura inicial adequada em água para o concreto de alta resistência, e quando se fizer necessário, revestimento dos elementos estruturais com película impermeável ou pintura. Tais medidas podem inibir a retração por secagem e a formação de tensões de tração.

Os resultados obtidos para concretos de alta resistência submetidos a ensaios de resistência à compressão axial também podem ser influenciados pela capacidade resistente do material utilizado para capeamento. A resistência não será prejudicada quando materiais adequados forem utilizados e possibilitarem uma distribuição de tensões uniforme em toda a seção transversal dos corpos de prova.

2. 4. 5. 2. 2 Resistência à tração

Os valores para a resistência à tração do concreto podem ser obtidos através de três diferentes ensaios: tração por compressão diametral, tração na flexão e tração direta, cujos resultados são influenciados pelo tamanho e forma dos corpos de prova (DAL MOLIN, 1995). A taxa de crescimento para a resistência à tração é alta nas primeiras idades em relação ao concreto convencional. Contudo, segundo DE LARRARD e MALIER (1992), o valor máximo da resistência à tração é atingido por volta dos 14 dias de hidratação.

A resistência à tração do concreto é usualmente determinada indiretamente através de relações entre módulo de ruptura e resistência à tração por compressão diametral. Porém, em concretos de alta resistência tais propriedades podem variar dentro de um vasto intervalo para os mesmos valores da resistência à compressão (AİTCIN, 2000). Logo, existem diversas equações empíricas que relacionam resistência à tração e resistência à compressão. Em sua grande maioria, são expressas da seguinte forma:

$$f_{ij} = a + bf_{cj}^n$$

Onde:

f_{ij} = resistência à tração, em MPa, aos j dias de idade;

f_{cj} = resistência à compressão, em MPa, aos j dias de idade;

n = coeficiente que varia de 0,5 a 1,0;

a, b = coeficientes que variam com os materiais, e nível de resistência considerado.

A norma brasileira NBR 6118 (2003) relaciona resistência à tração e resistência à compressão da seguinte forma:

$$f_{tk,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m}$$

Observa-se que o quociente da relação entre a resistência à tração e compressão diminui à medida em que a resistência à compressão aumenta (ACI 363, 1991; FIB/CEB, 1990). Todavia, tais valores não representam a realidade em concretos de alta resistência

Embora não esteja relacionado ao programa experimental em questão, em relação ao módulo de deformação do concreto, é fundamental ao projetista o conhecimento de tal propriedade para o cálculo das deformações dos diferentes elementos estruturais do sistema. A determinação direta do módulo de deformação é obtida através da determinação simultânea da carga aplicada e da deformação axial gerada por essa carga, tornando esse processo experimental complexo. Dessa forma, os valores são usualmente determinados utilizando abordagens teóricas ou empíricas. As relações empíricas correlacionam o módulo de deformação com a resistência à compressão (DAL MOLIN, 1995).

A abordagem teórica é baseada em modelos que representam o comportamento elástico do concreto (ILLSTON, DINWOODIE e SMITH, 1987). Já a abordagem empírica associa o módulo de deformação à resistência à compressão. Entretanto, a despeito das diversas equações para a obtenção do módulo de deformação, tais equações têm validade comprovada para o concreto convencional apenas. Ao elevar-se a resistência para valores acima de 50 MPa, as equações mostram-se inadequadas, superestimando os valores calculados do módulo de deformação (CARRASQUILLO et al., 1981; ACI 363, 1991).

3 CIMENTOS ALUMINOSOS EM CAR

3.1 Introdução

Com o crescente desenvolvimento mundial, o concreto deverá ser cada vez mais aproveitado e aperfeiçoado para acompanhar tal progresso. Uma forma de buscar um produto melhor e mais adequado é a utilização dos cimentos aluminosos como constituintes do concreto. O cimento aluminoso possui diversas propriedades singulares quando comparado ao cimento Portland, como altas resistências nas primeiras idades, endurecimento mesmo sob condições de baixas temperaturas, e durabilidade superior ao ataque por sulfato (NEVILLE, 1998). Além disso, devido à sua versatilidade, o cimento aluminoso pode ser utilizado como a única fase hidráulica no concreto, ou ainda constituindo uma mistura de materiais cimentícios (SCRIVENER, 2001).

O cimento aluminoso foi desenvolvido na França no começo do século XX como uma alternativa ao problema de ataque de estruturas de concreto por águas sulfatadas. A sua comercialização teve sucesso após a patente de Bied em 1908, e durante o auge da primeira guerra mundial, o que levou ao uso substancial desse material em estruturas de concreto maciço exposto ao mar e fundações em solos com alto teor de sulfatos, relata SCRIVENER (2001).

A resistência requerida para estas aplicações era muito modesta (por volta dos 10 a 20 MPa) e ocasionalmente alguns problemas ocorriam, entretanto, grande parte dos problemas sérios estava relacionada à perda de água necessária para a hidratação devido às altas temperaturas atingidas (por volta dos 100°C no concreto) e uma estrutura porosa altamente conectada. A maioria dos problemas era identificada antes da solicitação e uso das estruturas (SCRIVENER, 2001).

De acordo com as definições da ASTM C219, o cimento de aluminato de cálcio, ou cimento aluminoso, é o produto obtido da moagem do clínquer de aluminato de cálcio. O

clínquer é um produto parcialmente ou completamente fundido, consistindo de aluminatos de cálcio hidráulicos. Dessa forma, ao contrário do cimento Portland, onde o C_3S e o C_2S são os principais compostos cimentantes, no cimento aluminoso o aluminato monocálcico (abreviado como CA) é o principal constituinte cimentante, com $C_{12}A_7$, C_2AS , $2C_2S$ e F_{SS} como constituintes menores.

Este material contém grande quantidade de alumina, cerca de 40% de alumina e cal, 15% de óxidos férrico e ferroso e 5% de sílica. Além disso, podem estar presentes pequenas proporções de TiO_2 , MgO e álcalis (NEVILLE, 1997). As matérias primas são geralmente o calcário e a bauxita. Tipicamente, comentam MEHTA e MONTEIRO (1994), a análise química do cimento aluminoso corresponde a aproximadamente 40% de Al_2O_3 e alguns cimentos contêm teores ainda maiores de alumina (50 a 80%); por isso o cimento é também denominado cimento com alto teor de alumina ou high alumina cement (HAC).

Através do diagrama ternário do sistema $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ (Figura 3. 1), observa-se que o cimento aluminoso ocupa uma escala muito diferente e mais abrangente que o cimento Portland. Contudo, é constituído principalmente por uma fase de aluminato de cálcio (aluminato monocálcico $CaAl_2O_4$) como constituinte reativo (SCRIVENER, 2001).

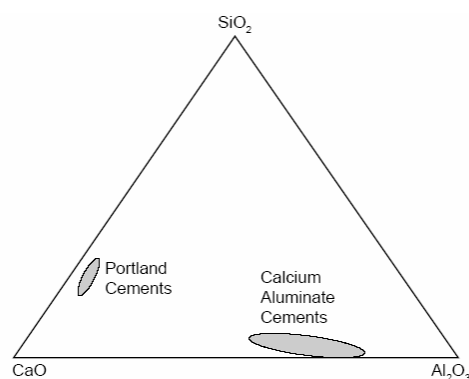


FIGURA 3. 1 – COMPOSIÇÃO DO CIMENTO ALUMINOSO EM COMPARAÇÃO AO CIMENTO PORTLAND (SCRIVENER, 2001)

Existem várias tentativas para classificação dos diferentes tipos de cimentos aluminosos, mas essencialmente há dois grandes grupos.

O primeiro grupo contém teor de Al_2O_3 aproximadamente entre 35 a 50%, e consiste de aluminatos de cálcio relativamente impuros, que também contém silício e ferro, conduzindo à presença de segundas fases como o C_4AF s.s. e C_2AS . O segundo grupo inclui cimentos brancos contendo teor de alumina acima de 80%, onde há relativamente maior pureza e produtos refratários. Embora esses últimos sejam produzidos pela sinterização a altas temperaturas, não são realmente produtos em equilíbrio, contendo reações intermediárias, fases secundárias, e algumas vezes até fases deliberadamente incorporadas, como o $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, adicionado após a queima. Entretanto, a fase que domina o comportamento da hidratação desses diversos materiais é o aluminato monocálcico, CaAl_2O_4 . Essa é a fase predominante presente em todos os tipos de cimentos que fazem parte desses dois grupos (MOHAMED e SHARP, 2001).

3. 2 Hidratação e Resistência

As propriedades do cimento aluminoso são dependentes das características de hidratação do cimento e da microestrutura da pasta endurecida, assim como no cimento Portland (TAHER; CHANDLER; ANDERSON, 1996).

Uma característica do cimento aluminoso é a elevada taxa de ganho da resistência nas primeiras idades, principalmente devido à reatividade do composto CA (GU; BEAUDOIN; QUINN; MYERS, 1997).

De acordo com NEVILLE (1997), a resistência do concreto contendo cimentos aluminosos em 24 horas de hidratação pode superar valores de resistência aos sete dias para concretos contendo cimento Portland comum. Além disso, cerca de 80% da resistência final é atingida em 24 horas de hidratação. O aumento da resistência ocorre devido à rapidez de hidratação, que resulta em um desprendimento elevado de calor de hidratação. A taxa de liberação de calor do cimento aluminoso recentemente hidratado

pode ser tão elevada quanto 9 cal/g por hora, valor aproximadamente três vezes maior do que a taxa para cimentos Portland de alta resistência inicial.

NEVILLE (1997) comenta que concretos contendo cimento aluminoso e agregado de clínquer de cimento aluminoso com relação água/cimento igual a 0,5 podem atingir resistências de aproximadamente 100 MPa em 24 horas e 120 MPa em 28 dias, a temperaturas moderadas. Esses valores de resistência são atingidos graças às propriedades cimentantes do agregado. Já em condições de cura abaixo de zero, a taxa de ganho de resistência também é maior do que em concretos contendo cimento Portland, conseqüentemente, o material é bastante interessante para aplicações em climas frios.

Todavia, apesar da alta resistência inicial desenvolvida, o endurecimento rápido não é acompanhado por uma pega rápida. O cimento aluminoso tem pega lenta, porém o fim de pega segue o início de pega com um intervalo de tempo muito menor em comparação ao cimento Portland (NEVILLE, 1997).

Em relação a misturas contendo cimento Portland conjuntamente com cimento aluminoso, pode ocorrer pega instantânea devido à reação entre a cal do cimento Portland e o aluminato de cálcio presente no cimento aluminoso. Além disso, o gesso do cimento Portland também pode reagir com os aluminatos de cálcio hidratados. Tais misturas formam a base de muitas argamassas e outros sistemas de reparos quando é necessária pega rápida, como em casos de vazamentos, ou serviços executados entre intervalos de marés, contudo a resistência final é muito baixa (NEVILLE, 1997). Segundo SCRIVENER (2001), a taxa de desenvolvimento da resistência pode ser aumentada através da utilização de aditivos ou adição de sulfato de cálcio.

Na Figura 3. 2 são mostrados os dados típicos para o tempo de pega, entretanto tais valores variam em função do tipo de cimento analisado. Para valores baixos de teor de cimento Portland, a pega acelerada ocorre devido à formação de C_4A hidratado pela adição de cal do cimento Portland ou aluminato de cálcio do cimento aluminoso. Já quando o teor de cimento aluminoso é baixo, o gesso do cimento Portland reagirá com os

aluminatos de cálcio hidratados e, como consequência, o cimento Portland, quando a pega não for retardada, exibirá pega instantânea.

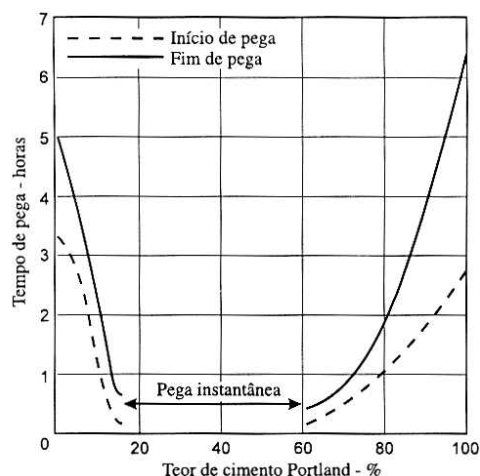


FIGURA 3. 2 – TEMPO DE PEGA PARA MISTURAS CONTENDO CIMENTO PORTLAND E CIMENTO ALUMINOSO (NEVILLE, 1997)

O CA, principal componente no cimento aluminoso, usualmente totaliza 50 a 60% em massa. Sua estrutura típica está apresentada na Figura 3. 3, e uma micrografia dos cristais de CA como ocorrem em uma fase de aglutinação é apresentada na Figura 3. 4.

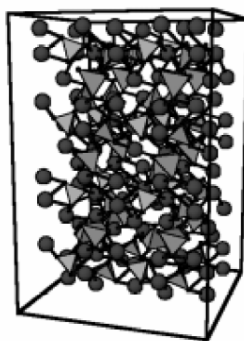


FIGURA 3. 3 – ESTRUTURA DO ALUMINATO MONOCÁLCICO (CA), MOSTRANDO OS ÁTOMOS DE Ca E O AlO_4 TETRAÉDRICO (PÖLLMANN, 2001).

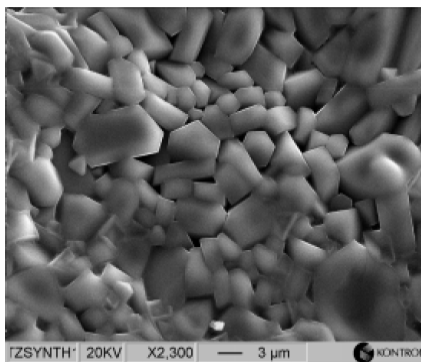


FIGURA 3. 4 – MICROGRAFIA DOS CRISTAIS PSEUDOHEXAGONAIS DO CA (PÖLLMANN, 2001).

A hidratação do CA, que tem maior velocidade de endurecimento, resulta na formação de CAH_{10} , pequena quantidade de C_2AH_8 e gel de alumina (Al_2O_3 aquoso). A composição dos produtos de hidratação mostra uma dependência tempo-temperatura; o produto de hidratação de baixa temperatura (CAH_{10}) é termodinamicamente instável, especialmente em condições quente e úmida de armazenamento nas quais se forma um componente mais estável, C_3AH_6 . Portanto, em um armazenamento prolongado, as fases hexagonais do CAH_{10} e C_2AH_8 tendem a se transformar em fases cúbicas de C_3AH_6 (SCRIVENER; CABIRON; LETOURNEX, 1999).

Essa transformação é denominada conversão do cimento aluminoso e, devido ao fato do sistema cristalino do primeiro composto ser pseudo-hexagonal, e do segundo, cúbico, refere-se à conversão como uma mudança da forma hexagonal para a cúbica (NEVILLE, 1997).

Segundo ANDIÓN et al. (2001), a resistência do concreto é determinada pela forma física das fases constituintes do material, onde a conversão é puramente relacionada a uma reação química que inicia tais mudanças físicas. Em particular, pequenos cristais formados imediatamente após a conversão são menos prováveis para iniciar a propagação de fissuras do que cristais maiores que podem se formar em seguida, devido à recristalização. O tamanho dos cristais em um dado momento no tempo é

obviamente relacionado de forma direta ao grau de porosidade. Na figura 3. 5 é possível observar, respectivamente, as fases hexagonal e cúbica mencionadas.

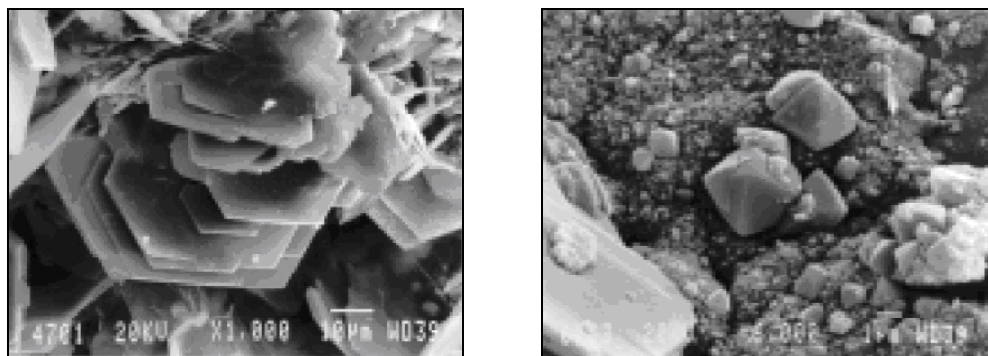


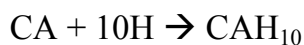
FIGURA 3. 5 – MICROGRAFIA DAS FASE HEXAGONAL E CÚBICA (ANDIÓN et al., 2001)

De acordo com NEVILLE (1997), quando o cimento aluminoso é submetido a altas temperaturas somente pode existir a forma cúbica de aluminato de cálcio hidratado. Já à temperatura ambiente, as duas formas podem estar presentes, no entanto os cristais hexagonais se converterão lentamente para a forma cúbica de forma espontânea. A reação de conversão para o CAH_{10} é apresentada a seguir:

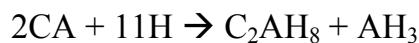


A razão para a lenta formação das fases estáveis é a sua alta simetria (cúbica) e complexa estrutura cristalina.

SCRIVENER (2001) comenta que a temperaturas baixas, em torno de 27°C, o primeiro hidrato a se formar é o CAH_{10} :



Para altas temperaturas predomina a formação de C_2AH_8 e, como a relação C/A desta fase é mais alta do que de CA, hidrato de alumina também se forma:



A reação de CAH_{10} para C_2AH_8 e hidrato de alumina, também ocorre como parte do processo de conversão e libera água:



As fases estáveis C_3AH_6 e AH_3 se formarão eventualmente a altas temperaturas:



Novamente, a quantidade de água reagindo com cada mole de CA é menor e isso significa que a conversão do C_2AH_8 (e CAH_{10}) para C_3AH_6 e AH_3 libera água:



Finalmente:



A conversão somente ocorrerá na presença de água, concluiu NEVILLE (1997), pois se incidem re-dissoluções e precipitações, e o grau de conversão pode ser avaliado pela relação entre a fração de compostos cúbicos e as frações totais dos compostos cúbicos e hexagonais, em porcentagem, conforme apresentado a seguir:

$$\frac{\text{massa de } \text{C}_3\text{AH}_6}{\text{massa de } \text{C}_3\text{AH}_6 + \text{massa de } \text{CAH}_{10}} \times 100$$

Caso a determinação da massa dos compostos não seja realizada em condições livres da presença de CO_2 há risco de decomposição do C_3AH_6 em AH_3 . Dessa forma, o grau de conversão será obtido em função desse último componente, com diferença não

significativa entre os resultados obtidos (NEVILLE, 1997). O grau de conversão será, em porcentagem, igual a:

$$\frac{\text{massa de AH}_3}{\text{massa de AH}_3 + \text{massa de CAH}_{10}} \times 100$$

O principal interesse no conhecimento e estudo da conversão reside no fato desta reação ocasionar perda de resistência no concreto de cimento aluminoso. Tal perda de resistência pode ser explicada devido à densificação dos compostos hidratados dos aluminatos. Os valores de densidade típicos para o CAH_{10} e C_3AH_6 são, respectivamente, 1,72 e 2,53 g/cm³. Portanto, considerando que as dimensões totais dos corpos são constantes (como por exemplo a pasta de cimento depois da pega), a conversão, com a concomitante liberação de água, resulta em aumento da porosidade da pasta (NEVILLE, 1997). Este fenômeno pode ser ilustrado pela medida da permeabilidade ao ar do concreto de cimento aluminoso convertido comparado ao não convertido, mostrado na Figura 3. 6.

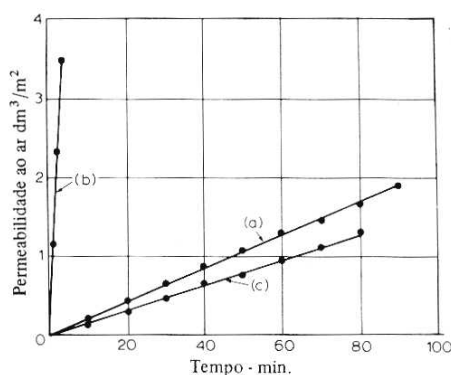


FIGURA 3. 6 – ESCOAMENTO DO AR ATRAVÉS DO CONCRETO: (a) CONCRETO DE CIMENTO ALUMINOSO NÃO CONVERTIDO; (b) CONCRETO DE CIMENTO ALUMINOSO CONVERTIDO; (c) CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND (NEVILLE, 1997).

Durante o processo de hidratação, a pasta de cimento aluminoso pode apresentar mais de 50% de redução no volume de sólidos, aumentando a porosidade e, dessa forma, causando redução na resistência. Uma porosidade de 5% pode reduzir em mais de 30% a

resistência, e uma redução de 50% é causada por uma porosidade da ordem de 8%. Tal valor pode ser atingido no processo de conversão e hidratação do cimento aluminoso mediante condições específicas (NEVILLE, 1997). A diminuição da resistência do concreto pode ser influenciada pela temperatura, relação água/cimento e teor de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Segundo NEVILLE (1997), a resistência do concreto de cimento aluminoso convertido é mais sensível a variações da relação água/cimento do que antes da conversão, e a perda de resistência é menor em condições de baixa umidade.

Entretanto, durante a conversão, a água liberada na hidratação pode reagir com cimento remanescente que não reagiu para formar futuros hidratos, que ao preencher espaços, diminuirão a porosidade e aumentarão a resistência. Além disso, para misturas com baixa relação água/cimento (abaixo de 0,4), a resistência irá diminuir para um mínimo antes de aumentar, o que pode ser observado na Figura 3. 7. Para altas relações água/cimento (acima de 0,7) grãos de cimentos anidros insuficientes permanecem depois da reação inicial (para hidratos metaestáveis), mas mesmo neste caso o decréscimo de resistência estabiliza a um mínimo. Quando há altas temperaturas durante a hidratação inicial (o que é comum devido à evolução substancial do calor) os hidratos estáveis se formam rapidamente e o concreto já está “convertido” quando entra em solicitação. Neste caso não há subsequente redução da resistência (SCRIVENER, 2001).

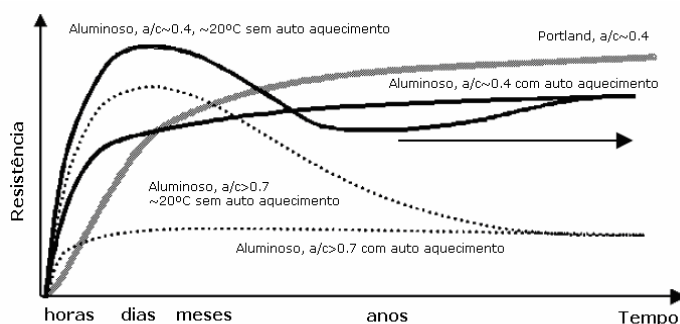


FIGURA 3. 7 – DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA PARA CONCRETOS DE CIMENTOS ALUMINOSOS (SCRIVENER, 2001).

Sendo a conversão uma característica inevitável da hidratação do cimento aluminoso, é importante em termos práticos para a utilização de concretos de cimento aluminosos, a capacidade de predeterminar seu impacto na resistência. A determinação atual é imergir o concreto em água a 38°C imediatamente após a moldagem e testar a resistência após cinco dias. Entretanto, devido à rápida hidratação do cimento aluminoso, o calor gerado durante o endurecimento (antes da utilização) da massa de concreto pode levar a temperaturas internas bem acima dos 38°C. Sob essas condições, a relevância da cura isotérmica a 38°C é questionável. A reação de conversão depende de dois parâmetros principais: temperatura e disponibilidade de água (FRYDA et al., 2001).

A comparação do efeito da conversão das propriedades mecânicas dos materiais de cimentos aluminosos foi estudada por LAMOUR et al. (2001). Destes estudos pode-se inferir que as propriedades elásticas, resistência à propagação de fissuras e ductilidade são menos afetadas pela conversão do que a resistência à compressão e à tração. Além disso concluiu-se que as amostras de argamassa são mais afetadas do que as de concreto, muito provavelmente por conterem maior quantidade de cimento.

Segundo LAMOUR et al. (2001) o módulo de elasticidade não é afetado pela conversão porque esta propriedade reflete uma rigidez média do agregado e da matriz, e a rigidez dos agregados permanece a mesma depois da conversão. O valor do módulo de elasticidade após a conversão é aproximadamente o que se esperaria da relação da resistência à compressão quando ambas as equações do ACI e do código CEB são utilizadas. Para concretos de cimento Portland foi descoberto empiricamente que a relação entre a resistência à tração e resistência à compressão segue a relação:

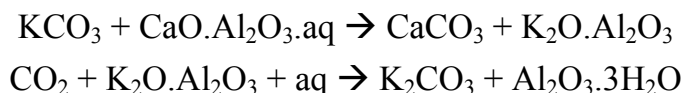
$$f_t = 0.3 (f'_c)^{2/3}$$

O cálculo desta quantidade pelos autores resultou em valores próximos à unidade para amostras convertidas e não convertidas. O coeficiente de Poisson é ligeiramente mais

baixo nas amostras convertidas, devido ao aumento do conteúdo de vácuo. Entretanto, muitos estudos mostram que esta relação é largamente estável até fissuras maiores se formarem (LAMOUR et al., 2001).

Desde o final dos anos 70 muitos esforços foram tomados para descobrir como evitar a conversão. Estudos extensivos foram realizados com adições minerais (sílica, escória, argilas calcinadas) e adição de calcários finos. Tais materiais modificam as reações de hidratação, levando à formação de C_2ASH_8 e $C_3A.Cc.Hx$. Estas fases são estáveis dentro de certos intervalos de temperatura e dentro de tais intervalos não se transformarão em C_3AH_6 . De qualquer forma, se o concreto está sujeito a temperaturas acima de $50^{\circ}C$, o C_3AH_6 poderá se formar. Por outro lado se a temperatura de hidratação é inicialmente baixa, a conversão do CAH_{10} para C_3AH_6 pode ainda ocorrer em longo prazo. Conseqüentemente é errado pensar em termos de prevenção global da conversão. Não obstante estas misturas podem ter propriedades interessantes a curto e longo prazo, em relação ao desenvolvimento da resistência e durabilidade, é importante que existam métodos que relacionem sua resistência a altas idades em situações de utilização (FRYDA et al., 2001).

Ainda em relação ao uso estrutural do concreto de cimento aluminoso, mesmo quando este apresente resistência adequada, devido ao aumento da porosidade provocada pela conversão o material estará mais vulnerável ao ataque químico em ambientes agressivos. A água que percola no concreto pode conter hidróxidos de sódio ou potássio, que irão acelerar a reação de conversão e provocar a decomposição dos produtos da hidratação. Na presença de CO_2 são formados carbonato de cálcio e o hidróxido alcalino se regenerará atacando novamente a pasta hidratada. As reações estão apresentadas a seguir:



Como os álcalis são apenas um portador, a reação global pode ser escrita da seguinte forma:



Dessa forma, observa-se que o cimento aluminoso sofre carbonatação, porém de maneira distinta do cimento Portland.

Em relação à cura, HOLTERHOFF JR. (2001) comenta que a temperatura ótima para concretos de cimentos aluminosos é aproximadamente 22°C. Se o concreto for curado acima de 30°C, poderá ocorrer decréscimo da resistência. Segundo o referido autor, um concreto que desenvolve 48 MPa de resistência depois de 24 horas, se curado apropriadamente pode apenas desenvolver metade ou ainda valores menores quando curado a temperaturas acima de 30°C. A cura fria pode conduzir a concretos que apresentem boas resistências iniciais, mas lentamente mais baixas nos meses e anos a seguir.

Os efeitos da temperatura, umidade, tipo de agregados e idade na resistência à compressão de concretos de cimentos aluminosos têm sido objeto de estudo por mais de 40 anos. Entretanto, segundo FRYDA et al. (2001), do ponto de vista do projeto, a resistência à compressão não é parâmetro suficiente para caracterização do concreto de cimento aluminoso e suas aplicações atuais. Outros parâmetros mecânicos como propriedades elásticas, dureza, ductilidade ou resistência à tração, são necessários para caracterizar o desempenho mecânico desse material. Em termos de durabilidade, o controle da fissuração é a chave para garantir um bom desempenho em ambientes agressivos.

3.3 Resistência a Ataques Químicos

Uma das características que distinguem o cimento aluminoso dos cimentos Portland é que não há formação de hidróxido de cálcio como produto de hidratação. Dessa forma, concretos contendo tal tipo de cimento apresentam excelente resistência aos ambientes ácidos (ácidos diluídos, pH de 4,0 a 6,0), água do mar e águas sulfatadas (SCRIVENER; CABIRON; LETOURNEX, 1999).

Segundo NEVILLE (1997), o cimento aluminoso resiste à ação do CO_2 dissolvido em água, mas não é ácido-resistente. Pode suportar soluções ácidas diluídas, como em efluentes industriais, contudo, não resiste à ação de soluções contendo ácidos clorídricos, fluorídricos ou nítricos. O cimento aluminoso também é atacado pelos álcalis cáusticos mesmo em soluções diluídas.

De fato, o cimento aluminoso foi desenvolvido inicialmente na França para resistir à ação dos sulfatos em estruturas de concreto, e é muito satisfatório sob esse aspecto. Esta resistência é alcançada, de acordo com NEVILLE (1998), devido não só à ausência de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no cimento aluminoso hidratado como também à influência protetora do gel de alumina relativamente inerte formado durante a hidratação.

A utilização do cimento aluminoso em redes de esgotos sujeitas à ação dos sulfatos data antes de 1950, segundo estudos de SCRIVENER (2001), com muitos exemplos de bom desempenho na Austrália, Malásia, África do Sul e Egito.

As redes de esgoto, principalmente em regiões de climas quentes podem sofrer corrosão bacteriológica. Sob certas condições, o ácido sulfúrico é produzido nas canalizações pela bactéria “thiobacillus”, atacando a pasta de cimento e quaisquer agregados solúveis em ácidos, como a dolomita e o calcário. Em seguida ocorre a corrosão da armadura, resultando no colapso da estrutura. Tal ataque é mais severo no nível de superfície das águas servidas, onde os produtos de corrosão são continuamente removidos pelo fluxo através dos canais (ALEXANDER e FOURIE, 2001).

Estudos de DUNSTER e HOLTON (2001) mostram que estruturas maciças de concreto com cimento aluminoso freqüentemente exibem um efeito de “superfície de densificação”, o que contribui significativamente para o desempenho geral em condições agressivas de solos com sulfatos e condições marinhas.

Segundo ALEXANDER e FOURIE (2001), canais de concreto produzidos com cimentos aluminosos resistem ao ataque sulfúrico biológico melhor que canais produzidos com cimento Portland. Os autores sugerem que uma das razões para que o cimento aluminoso tenha um desempenho maior em ambientes ácidos é porque esse material tem

uma alta capacidade de neutralização ácida em comparação com o cimento Portland. Sendo assim, na presença de cimento aluminoso, a atividade da bactéria é reduzida, além da presença de hidrato de alumina, que bloqueia os poros e reduz o grau de degradação.

Em países como a África do Sul, onde grande parte da população está sujeita ao saneamento inadequado, além da crescente urbanização e dos recursos limitados, tem sido desenvolvido um novo conceito para a fabricação de canais de esgotos de concreto. Nesses locais, onde alguns efluentes são extremamente agressivos devido a fatores hidráulicos ou descargas industriais com baixo pH, o uso de um material de revestimento inerte pode ser a única alternativa viável. Este revestimento é formado por uma camada de sacrifício contendo cimento aluminoso e agregado dolomítico, e cobre um canal convencional de concreto de cimento Portland. No substrato de cimento aluminoso, menos ácido é produzido pela bactéria e, dessa forma, o pH é mais alto, resultando em menor potencial para corrosão (GOYNS, 2001).

Já em relação à carbonatação, há um consenso geral de que o cimento portland comum é mais resistente do que os cimentos aluminosos, do ponto de vista dos diferentes efeitos de suas fases hidratadas e conteúdo de álcalis dos cimentos (GAZTAÑAGA; GOÑI; GUERRERO, 2001).

Entretanto, alguns estudos comparativos têm sido realizados para amostras equivalentes de cimento Portland e cimentos aluminosos. SNOLCZYC (apud AİTCIN, 2000) apontou que o material residual não carbonatado é independente do tipo de cimento e da relação água/cimento, atingindo valores por volta de 25 a 30% do total de CaO contido no cimento. GAZTAÑAGA et al. (apud AİTCIN, 2000) estudou a influência do conteúdo de álcalis na carbonatação de dois tipos de cimento Portland e de pastas de cimento aluminoso (relação água/cimento igual a 0,4). A carbonatação foi realizada depois da cura por 28 dias, em exposição natural à atmosfera laboratorial (40 a 50% UR) por 800 dias. Os resultados mostraram que a pasta de cimento aluminoso carbonatada apresentou a mais baixa taxa, 31% do CaO residual não carbonatado contra 37 e 43% para o cimento Portland com alto e baixo conteúdo de álcalis, respectivamente.

Dessa forma, a visão tradicional que o concreto de cimento aluminoso é mais vulnerável que o concreto de cimento Portland quanto à corrosão da armadura pela carbonatação não é mais apoiada pela experiência de campo acumulada ou análises teóricas (GAZTAÑAGA; GOÑI; GUERRERO, 2001).

Conforme mencionado, o processo de degradação identificado e mais conhecido que sofrem os cimentos aluminosos é o chamado de conversão dos hidratos hexagonais de aluminato de cálcio para a forma cúbica. Em adição a esse processo, o concreto de cimento aluminoso pode sofrer carbonatação devido à reação com o CO_2 atmosférico e a transformação de fase denominada “hidrólise alcalina” ocorre conduzindo à destruição completa do concreto (DUNSTER e HOLTON, 2001).

ANDRADE et al. (2001) relata a ocorrência de alguns casos de degradação de estruturas de concreto contendo cimentos aluminosos registrados na Espanha há muitos anos, embora a preocupação social só tenha ocorrido em 1990 quando uma edificação entrou em colapso causando uma fatalidade. Principalmente nas regiões da Espanha Mediterrânea, há mais de um milhão de “flats” construídos com cimentos aluminosos antes de 1975. Após o acidente em 1990, um programa detalhado de inspeção e reparo foi realizado pelas autoridades locais, minimizando o risco de futuras falhas. Paralelo a este programa, a pesquisa tecnológica se desenvolveu nesse país, cujo tema principal foram os mecanismos de degradação dos materiais produzidos com cimento aluminoso.

Segundo os autores, enquanto a carbonatação dos cimentos Portland usualmente leva à despassivação do aço da armadura e conseqüente corrosão, em concretos de cimentos aluminosos esta circunstância nem sempre acontece e o aço pode manter-se passivo. Este comportamento está associado ao pH da solução e ao conteúdo de álcalis do cimento. Além disso, considerando o conteúdo de álcalis, devido ao uso de agregados de granito ou feldspato das regiões mediterrâneas, alguns desses concretos podem conter grandes quantidades de álcalis do que aqueles simplesmente liberados pelo cimento, resultando em casos de hidrólise alcalina.

Além disso, de acordo com ANDRADE et al. (2001) a alcalinidade da solução porosa de argamassas de cimentos aluminosos medidas através do indicador de fenolftaleína é função do grau de saturação de água dos poros. Assim ele torna-se alcalino em condições úmidas, e neutro quando seco. Este efeito não foi verificado em materiais produzidos com cimento Portland. Os diferentes regimes de carbonatação empregados conduziram à formação de diferentes fases cristalinas que evoluem diferentemente quando submetidas a ciclos de molhagem e secagem. Esta divergência confirma a complexidade e diversidade dos processos que podem se desenvolver durante a carbonatação das pastas de cimento aluminoso.

O comportamento das fases de alumínio hidratado formadas dos cimentos aluminosos pode conduzir a diferentes fases finais estáveis que dependem principalmente dos seguintes fatores:

- pH da solução aquosa de poros;
- temperatura;
- grau de saturação dos poros;
- concentração ou pressão parcial do CO₂ na atmosfera.

Apesar das diversas propriedades apresentadas, a aplicação do cimento aluminoso na maioria dos países se restringe à execução de revestimentos refratários moldados em fornos de alta temperatura (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

3. 4 Propriedades Refratárias

O uso de cimento Portland para concreto exposto a altas temperaturas está limitado a aproximadamente 500°C, porque a altas temperaturas o óxido de cálcio livre, formado na decomposição do hidróxido de cálcio, causaria a deterioração do concreto aquecido ao ser exposto à umidade ou à água (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O cimento aluminoso, além de não produzir nenhum hidróxido de cálcio na hidratação, endurece rapidamente sob temperaturas normais de cura. Até cerca de 500°C os concretos de cimento aluminoso apresentam redução na resistência em proporção maior do que aqueles contendo cimento Portland; a partir desse valor até 800°C, os dois são comparáveis, mas acima de cerca de 1000°C, o cimento aluminoso tem um desempenho significativamente maior (NEVILLE, 1997).

Segundo estudos de NEVILLE (1997) em concretos contendo cimentos aluminosos e diferentes agregados submetidos a intervalos de temperatura até 1100°C, a resistência mínima varia entre 5% e 26% do valor original. Porém, quando utilizados determinados agregados, entre 700 e 1000°C ocorre aumento na resistência devido a uma força de coesão, denominada pega cerâmica. Tal força surge devido a reações sólidas entre o cimento e o agregado miúdo, e aumenta em função da temperatura e com a evolução das reações no material.

Devido a tal força, concretos de cimentos aluminosos resistem a temperaturas elevadas, suportando temperaturas iguais a 1350°C, quando utilizado agregado britado de tijolos refratários. Com a adição de alguns agregados especiais, como alumina fundida ou carborundum, temperaturas de 1600°C podem ser atingidas. Já concretos preparados com cimento especial de aluminato de cálcio branco e agregados de alumina fundida, podem resistir a temperaturas de 1800°C durante períodos prolongados (NEVILLE, 1997).

Propriedades mecânicas, comportamento durante a cura e calor inicial das misturas de cimentos aluminosos são características decisivas em aplicações refratárias. O primeiro aquecimento após a cura conduz a mudanças irreversíveis, em particular a conversão e decomposição dos hidratos. Tais mudanças são geralmente acompanhadas por uma perda de resistência. A resistência é recuperada, entretanto, quando a temperatura torna-se alta o suficiente para permitir a sinterização. As propriedades de alta temperatura dos cimentos aluminosos dependem de numerosos parâmetros como a composição química, tamanho das partículas, homogeneidade e porosidade (NORTON-BERRY; GHANBARI AHARI; LEE, 2001).

Segundo NEVILLE (1997), concretos refratários de cimentos aluminosos têm uma boa resistência ao ataque por ácidos, como por exemplo os ácidos presentes em gases resultantes de combustão, sendo, de fato, a resistência química aumentada pela queima até 900 a 1000°C. Tais concretos podem ser levados à temperatura de serviço tão logo tenham endurecido, não necessitando de aquecimento prévio. Enquanto os revestimentos com tijolos refratários se dilatam com o calor e necessitam de juntas de dilatação, concretos de cimentos aluminosos podem ser executados monoliticamente, ou com juntas de topo a cada um ou dois metros nas formas e dimensões pretendidas. A perda de água no primeiro aquecimento resulta numa contração aproximadamente igual à dilatação térmica durante o aquecimento, de modo que as variações dimensionais resultantes são muito pequenas, dependendo do tipo de agregado. Além disso é possível a execução de revestimentos refratários com jateamento de argamassa de cimento aluminoso.

Refratários são materiais que mantêm o desempenho quando submetidos a altas temperaturas e são utilizados em processos de fabricação de metais, vidro, cimento, entre outros. Tradicionalmente, quase todos os refratários têm a forma de tijolos, que são colocados um a um, manualmente. Este processo tem um alto custo em relação à mão de obra e tempo de execução. Em revestimentos monolíticos, as propriedades cimentantes do aluminato de cálcio são utilizadas para produzir um concreto que desenvolva a resistência mesmo quando sujeito a uma temperatura ambiente. Durante o primeiro aquecimento, a água combinada com os hidratos se evapora e novas fases anidros se formam, o que proporciona alta resistência à temperatura graças à pega cerâmica já mencionada. Devido à diversidade das condições de serviço (temperatura, abrasão, ataque químico, etc.) há uma grande variedade de concretos refratários, o que indica o grande poder de adaptação dos cimentos aluminosos. Sendo assim, sistemas formados por concreto de cimentos aluminosos são utilizados em quase todas as aplicações refratárias, como em instalações para fabricação de aço e ferro, instalações petroquímicas, instalações de refino não ferroso e fundição, além de indústrias de fabricação de cimento Portland e outros minerais (TOUZO; BELL; SCRIVENER; PARR, 2001).

Não há um consenso mundial na temperatura mínima que um material pode suportar para ser qualificado como refratário, mas a norma francesa AFNOR NF B 40-001 considera que o cone pirométrico equivalente deve ser ao menos 1500°C. Na fabricação do aço, cimento, e vidro, as temperaturas variam entre 1300°C a 1900°C (BOCH; MASSE; LEQUEX, 2001).

3.5 Resistência à abrasão e impacto

O concreto de cimento aluminoso foi utilizado na construção de minas primeiramente na África do Sul, cerca de 25 anos atrás, apresentando excelente desempenho até tais minas serem fechadas no ano de 2000. Foram obtidas resistências de 77 MPa aos sete dias de hidratação e esse valores chegaram a 90 MPa aos 28 dias de hidratação. Desde então a aplicação foi estendida a outras áreas de mineração no Canadá e Austrália (SCRIVENER, 2001).

Testes recentes mostraram que a resistência ao impacto e à abrasão não são propriedades diretamente proporcionais à resistência à compressão. SCRIVENER (2001) relata que a excelente resistência à abrasão, mesmo quando presente baixa resistência à compressão, foi confirmada por estudos de comparação entre concreto convencional e de alta resistência contendo cimentos aluminosos e concreto de alta resistência utilizando cimento Portland. Para resistências comparáveis (130 MPa) o concreto de alta resistência produzido com cimento aluminoso apresentou resistência à abrasão duas vezes maior que o concreto de cimento Portland. Já o concreto convencional apresentou praticamente a mesma resistência à abrasão que o de mais alta resistência.

Segundo SCRIVENER (2001) a alta resistência à abrasão e impacto do concreto de cimentos aluminosos ocorre devido à natureza da zona de transição entre a pasta e o agregado. Normalmente a dificuldade de acomodação dos grãos de cimento contra a superfície de agregado leva a uma alta porosidade na zona de transição. Por consequência da alta mobilidade dos íons, durante a hidratação inicial, esta porosidade pode ser

preenchida por produtos de hidratação. Tal propriedade dos concretos de cimentos aluminosos tem levado à sua utilização em estruturas hidráulicas sujeitas ao desgaste, como vertedouros, comportas deslizantes e linhas de túneis de limpeza na França, Suécia, Peru, entre outros países.

3. 6 Trabalhabilidade do Concreto de Cimentos Aluminosos

Ao considerar as aplicações do cimento aluminoso em concreto é necessário discutir as características principais da trabalhabilidade desse material. De acordo com SCRIVENER (2001) caso a mineralogia do cimento não seja adequadamente controlada durante o processo de fabricação, poderá ocorrer um rápido enrijecimento e conseqüente perda de trabalhabilidade no concreto. De qualquer forma, para equivalentes relações água/cimento, concretos produzidos com boa qualidade de cimentos aluminosos têm características de plasticidade comparáveis aos produzidos com cimento Portland. Entretanto, existem dois pontos importantes que diferenciam a reologia do concreto de cimento aluminoso do concreto de cimento Portland:

- 1) Os concretos de cimentos aluminosos tendem a ser mais tixotrópicos, parecendo ser mais rígidos antes de serem vibrados, mas rapidamente fluidificados durante a vibração;
- 2) Os tipos clássicos de superplastificantes para cimento Portland (lignossulfatos e polinaftalenos sulfonados) têm somente um efeito modesto nos concretos de cimentos aluminosos.

Conseqüentemente, para relações água/cimento inferiores a 0,4 é recomendável maior consumo de cimento (acima de 400 kg/m^3) de forma a garantir um bom lançamento e resistência adequada. Uma “nova geração” de superplastificantes (chamados de PCP’s – poly carboxylate polyox – policarboxilatos) está sendo desenvolvida para melhoria da

reologia do concreto de cimento aluminoso. Todavia, se usados incorretamente, esses aditivos podem retardar significativamente o tempo de pega da mistura. De qualquer forma, a compatibilidade entre uma reologia adequada e tempo de pega normal pode ser atingida, mesmo usando policarboxilatos em combinação com outras adições ou ajustando o tempo de adição do aditivo no processo de mistura, além do tempo de mistura (SCRIVENER, 2001).

A hidratação do cimento aluminoso, segundo CHATERJEE (2001), é dependente da dissolução e precipitação. Sendo assim, a taxa de dissolução dos íons Ca^{2+} e Al^{3+} , junto com os íons H^+ e OH^- (pH), influenciam a hidratação e o endurecimento. De acordo com o referido autor a utilização de aditivos químicos para controlar a taxa e seqüência da reação de hidratação é extremamente importante.

Esses aditivos modificam as propriedades de argamassas e concretos baseados em cimentos aluminosos tipicamente alterando a precipitação dos hidratos. Na literatura estudos das variações em concentrações iônicas que ocorrem durante a hidratação de sistemas de cimentos aluminosos com aditivos têm proporcionado informação a respeito da forma com que algumas adições afetam a hidratação (COX; SHARP, 2001).

Além dos policarboxilatos, devido à finura das partículas do cimento aluminoso, outros aditivos são freqüentemente recomendados para dispersão, retardamento e aceleração:

- Fosfatos, como sódio tripolifosfato e sódio hexametáfosfato, oxicarbolatos como o ácido cítrico, além de gluconato de sódio, entre outros, como dispersantes;
- Boratos, silicofluoretos, citrato de sódio trissódico, além de outros tipos, como retardadores de pega;
- Sais de Lítio, hidróxido de cálcio, aluminatos, entre outros, como aceleradores de pega, especialmente em ambientes sujeitos a baixas temperaturas.

Outro aditivo redutor de água mais eficiente tem sido estudado para misturas de cimentos aluminosos, segundo COLLEPARDI et al. (2001). Este aditivo químico é um

éster acrílico copolímero (CAE – Copolymer Acrylic Ester) que demonstrou ser muito mais eficiente que os aditivos de naftaleno ou melanina, freqüentemente utilizados para misturas de cimento Portland.

As adições podem interferir na hidratação do cimento de diversas formas, e podem ter efeitos dramáticos nas propriedades de produtos baseados em cimentos, com sério potencial prático e conseqüências financeiras. A ação dos aceleradores e retardadores para os cimentos aluminosos tem sido considerada com respeito à dissolução dos cimentos anidros, e os processos de nucleação e precipitação para os produtos de hidratação principais, C_2AH_8 , CAH_{10} , e C_3AH_6 e AH_3 . A maior parte deste trabalho tem focado a ação do Lítio, que é um excelente acelerador e capaz de causar pega instantânea, além do Citrato, que é um grande retardador (AMATHIEU; BIER; SCRIVENER, 2001).

3. 7 Durabilidade

Conforme mencionado, um número considerável de falhas e defeitos foram detectados na última década, muito dos quais relacionados à utilização dos cimentos aluminosos, mostrando a necessidade de investigação das mudanças nas propriedades e comportamento desse material (ANDIÓN et al., 2001).

Alguns colapsos devido a perdas graduais de resistência associadas ao concreto contendo cimentos aluminosos ajudaram na limitação do uso deste cimento em aplicações estruturais (DING; FU; BEAUDOIN, 1997).

Todavia, as evidentes vantagens dos cimentos aluminosos, especialmente o desenvolvimento inicial da resistência, além dos danos causados pela Segunda Guerra originaram um crescimento acelerado da construção civil durante essa época. Os processos de cura a vapor para concreto pré-moldado de cimento Portland não tinham sido bem desenvolvidos. Dessa forma, o rápido endurecimento proporcionou o uso do concreto de cimento aluminoso em diversas estruturas de concretos pré-moldados e protendidos em muitos países, principalmente no Reino Unido (SCRIVENER, 2001).

Entretanto, segundo ANDIÓN et al. (2001), o conhecimento insuficiente da química e do comportamento cristalográfico a longo prazo desse tipo de cimento e conseqüente falta de prática de regras adequadas à utilização, levaram a casualidades fatais na segunda metade dos anos 70 no Reino Unido, Alemanha, França, Espanha, entre outros países. Entre os principais erros na utilização do cimento aluminoso estava a aplicação das mesmas práticas de construção utilizadas para o cimento Portland. Além desses, a falta de atenção adequada a parâmetros como relação água/cimento e conteúdo de cimento, que são importantes para o concreto de cimento Portland e se tornam críticos para concretos de cimentos aluminosos.

Sabendo dos problemas ocasionados pelas altas relações água/cimento, decidiu-se manter o limite máximo de 0,4. Já o limite mínimo para consumo de cimento foi estabelecido em 400 kg/m³. Porém, a baixa relação água/cimento implicava em dificuldades para o lançamento e trabalhabilidade e, dessa forma, nem sempre tal limite era respeitado, gerando então maior porosidade. Conseqüentemente, em 1973 e 1974 três construções entraram em colapso. Em dois casos as maiores falhas foram identificadas como erros de projeto, e a perda de resistência gerada pela conversão foi indicada como uma causa de possível contribuição. De fato, em uma das construções, as vigas originais foram utilizadas na reconstrução. No terceiro caso um ataque por sulfato foi identificado como a maior causa de degradação, facilitada pela alta porosidade do concreto devido à utilização de uma relação água/cimento alta (SCRIVENER, 2001).

Em seguida, comenta SCRIVNER (2001), foram realizadas inspeções em todas as edificações semelhantes com vigas em concreto de cimento aluminoso. Das 1022 (mil e vinte e duas) edificações inspecionadas, 38 (trinta e oito) foram identificadas com problemas de perda de protensão, e destas, apenas uma tinha sido causada por perda de resistência devido à conversão do cimento aluminoso. Segundo o referido autor, estima-se que haja de 30.000 (trinta mil) a 50.000 (cinquenta mil) edificações contendo cimentos aluminosos no Reino Unido e todas continuam a apresentar desempenho satisfatório. Entretanto, como nas vigas de concreto de cimento Portland da mesma idade, a

carbonatação em muitos casos já atingiu a profundidade da armadura. Todavia, a condição interna de muitas é tal que apresentam umidade relativamente baixa e riscos insignificantes de corrosão do aço.

A durabilidade do aço e do concreto governa a permanência da vida útil da estrutura. Dessa forma, esforços de pesquisa em corrosões a longo prazo do aço em estruturas de concreto em relação à durabilidade geral têm sido concentrados em concreto ou argamassas com cimento Portland. Pouca informação sobre objetivos similares para concreto de cimento aluminoso aparece na literatura técnica especializada. Conforme já discutido, a composição química e o comportamento de concretos de cimentos aluminosos diferem substancialmente do concreto de cimento Portland convencional. Portanto, é necessário estudar a durabilidade específica das estruturas de cimentos aluminosos não somente do ponto de vista do efeito da idade, parâmetros ambientais e penetração de agentes agressivos no concreto, mas também em relação às consequências da alteração do concreto ao ataque da corrosão da armadura (ANDIÓN et al., 2001).

ANDIÓN et al. (2001) concluíram que as armaduras não se tornam mais corroídas devido à carbonatação do cobrimento de concreto de cimento aluminoso, além disso, em alguns casos a carbonatação parece inibir a corrosão do aço. E os resultados de seus estudos mostram que, quando comparados a argamassas de cimento Portland, uma quantidade maior de produtos de corrosão é necessária para fissurar argamassas de cimentos aluminosos. Isto se aplica para ambas as condições: convertidos e não convertidos.

Os acontecimentos relatados geraram um clima de incerteza quanto ao concreto de cimento aluminoso, e mudanças nas normas foram feitas para prevenir efetivamente a utilização desse material em aplicações estruturais. Tais acontecimentos ilustram a importância do bom entendimento do comportamento destes materiais a idades mais avançadas. Com este fim, um estudo foi desenvolvido pela Concrete Society, no Reino Unido, readmitindo a utilização do cimento aluminoso na construção. Suas descobertas foram publicadas em 1997, e suas conclusões reafirmaram que qualquer projeto deve ser

baseado na resistência após o processo de conversão. Além disso, deve ser respeitado o limite para relação água/cimento e consumo de cimento.

3. 8 Outras Aplicações

As interações químicas entre os cimentos aluminosos e polímeros são responsáveis por materiais de características únicas de processo, comportamento mecânico e durabilidade. De acordo com TOUZO et al. (2001), a alta reatividade dos cimentos aluminosos permite que este material seja empregado em diversas aplicações. Esta possibilidade foi provada pela inovação de cimentos MDF (Macro Defect Free) de alta resistência à flexão, nos anos 80. Embora muitos cimentos hidráulicos possam ser utilizados na fabricação dos cimentos MDF, o cimento aluminoso tem atraído a atenção devido às propriedades mecânicas superiores, atingindo resistências à flexão de 150 a 200 MPa. Resistências tão altas quanto 230 a 330 MPa foram atingidas subseqüentemente.

Quanto ao rápido endurecimento do concreto de cimento aluminoso, esta propriedade proporciona algumas aplicações especiais. Entre as quais está a utilização em um método de pré-escavação. Neste processo um arco de túnel de concreto temporário é estabilizado antes da escavação do furo do túnel. A vantagem deste método é a diminuição do risco de desabamento, proporcionando segurança e melhores condições de trabalho, além de uma alta produtividade. Além disso, as qualidades de endurecimento rápido observadas a temperaturas normais têm valores particulares em condições de clima muito frio. Tais valores são influenciados pela alta taxa de evolução do calor durante a hidratação, mesmo a temperaturas por volta de 0°C. O concreto de cimento aluminoso pode desenvolver resistência de 20 a 30 MPa ou mais em 16 horas. Isto tem levado a diversas aplicações no Ártico, como injeção em cabos de tirantes e outros trabalhos gerais de concretagem. Além disso, a boa tolerância ao choque permite o uso desse material em instalações de gás (SCRIVENER, 2001).

As propriedades refratárias do cimento aluminoso são de extrema importância na concepção das Fire Training Facilities (FTFs), que são edificações especiais, paredes, ou pavimentos de superfície plana projetados para resistir à deterioração quando expostos ao calor e contato direto com o fogo. As estruturas são preparadas para utilização com vários materiais inflamáveis, como madeira, mobília, óleos e pinturas, ou até mesmo gasolina. Os materiais são queimados com o propósito de treinar novos recrutas pelo Corpo de Bombeiros. A estrutura é planejada para resistir aos materiais inflamáveis, simulando um incêndio convencional. Dessa forma, o cimento aluminoso é o material normalmente escolhido como aglomerante para tal aplicação, pois suporta satisfatoriamente as condições de serviço requeridas (HOLTERHOFF JR., 2001).

Outro recente uso dos cimentos aluminosos é como precursor da formação de etringita. Os cimentos aluminosos são virtualmente livres de sulfato e a necessidade de sulfato para a formação de etringita é atingida pela aglutinação de partículas de cimento com anidrita ou gipsita, ou ambos. Produtos baseados em etringita têm um vasto campo de aplicação. Formulações contendo água próximo do mínimo requerido asseguram plasticidade e são largamente utilizados em pavimentos, sistemas de reparo, além, de suporte do teto para minas (SATO; PUSHPALAL; MAEDA, 2001).

A produção de etringita, segundo SCRIVENER (2001), pode também ser controlada para compensar a retração e evitar fissuração. Além disso, a etringita pode combinar água livre, sendo 47% do peso da fórmula da etringita devido à água combinada, que é 50% maior do que a combinada no C-S-H. Isto significa que mesmo com alta relação água/cimento (0,5 a 0,7), a água adicionada na mistura é combinada em hidratos e a quantidade de água livre cai rapidamente.

A etringita está associada a problemas de durabilidade, através do fenômeno de ataque externo por sulfatos e a expansão que ocorre muito ocasionalmente em concretos de cimento Portland sujeitos a temperaturas elevadas (acima de 70°C) durante a cura. Em ambos os casos a degradação resulta da formação de etringita dentro de uma massa sólida sobre condições particulares de concentração de solução e distribuição de poros (a

recristalização de etringita secundária em poros e vazios, que ocorre em quase todos os concretos de cimento Portland expostos à umidade não é prejudicial). Providenciando todo o sulfato de cálcio reagente durante o período inicial de reação, nenhuma expansão prejudicial irá ocorrer, comenta SCRIVENER (2001). Além disso, materiais contendo grandes quantidades de etringita, segundo o referido autor, podem apresentar um decréscimo na resistência devido à liberação de água. Em sistemas altamente porosos com etringita como quase o único hidrato, a queda na resistência será grande.

Segundo COLLEPARDI et al. (2001), misturas de cimentos reforçados com fibras são caracterizadas por ter uma relação água/cimento muito baixa, presença de adições, superplastificantes e agregados finos, sendo utilizados na produção de argamassas de alto desempenho (alta resistência e alta energia de fratura). Tais misturas são conhecidas como “Reactive Powder Concretes” (RPC) e são interessantes para aplicações práticas em áreas não usuais relacionadas à edificação e engenharia civil. Estas novas áreas incluem:

- Engenharia Química (utilização do RPC para compartimentos impermeáveis de gases ou líquidos utilizados em instalações químicas);
- Engenharia Ambiental (construção de sistemas impermeáveis para eliminação ou contato com produtos nucleares);
- Engenharia Mecânica (produção de moldes resistentes ao impacto ou abrasão utilizados na fabricação de peças automotivas metálicas ou poliméricas).

Acima de todas as vantagens dos cimentos aluminosos está a flexibilidade de utilização com uma variedade de outros tipos de cimentos, minerais e aditivos, de forma a obter materiais com propriedades distintas. Após quase um século de experiência, as aplicações dos cimentos aluminosos são cada vez mais diversas. O custo desse material significa que não é um substituto para o cimento Portland em aplicações onde este último obtenha desempenho favorável. Ao contrário, onde seu custo seja justificado por suas propriedades especiais isto estenderá o campo de aplicações de materiais cimentícios em geral (SCRIVENER, 2001).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O método científico utilizado nesse trabalho é o Método Experimental. Este método conduzirá os procedimentos sistemáticos para a descrição e explicação do estudo. O método experimental, segundo GOODE e HATT (1981), desempenha a função de descobrir conexões causais e atingir a demonstrabilidade e, dessa forma, comprovar os princípios tecnológicos ou científicos. De acordo com FACHIN (2003), o método experimental é a análise de dados que conduzam a respostas para hipóteses em relações de causa e efeito, logo, demonstrou ser o mais adequado ao estudo em questão.

A experimentação é o processo de observação que se dá em um meio especialmente criado para estudar os objetos da pesquisa. Permite isolar as variáveis independentes e dependentes, as quais podem ser estudadas num meio-ambiente controlado. As respostas são obtidas em situações onde se pode manipular o comportamento de forma direta, precisa e sistemática, sendo possível isolar variáveis, como no caso de experimentos em laboratório (CERVO, 2002).

O Programa Experimental foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico do concreto de alta resistência contendo cimentos aluminosos através da análise dos efeitos dos fatores controláveis estabelecidos em suas propriedades. Com o intuito de obter parâmetros de caracterização mecânica do concreto de alta resistência, para representação adequada do fenômeno em estudo, foram definidas as seguintes variáveis de resposta:

- Resistência à Compressão
- Resistência à Tração por Compressão Diametral

As propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna. Dessa forma, para auxiliar na compreensão e estudo da microestrutura do concreto e seus materiais constituintes, foi realizada análise microestrutural através de microscopia óptica, análise de fases por difração de raios-X e fluorescência de raios-X, além de análise petrográfica.

4. 1 Planejamento dos Ensaios

4. 1. 1 Ensaios Mecânicos

Diversos são os fatores que influenciam as propriedades de um determinado material, como o concreto, e seus efeitos são interligados. O aumento do número de fatores controláveis implica em maior número de ensaios, e conseqüentemente, maiores custos e dificuldades na realização do planejamento experimental. Portanto, os seguintes fatores controláveis foram definidos para o estudo em questão:

a) Relação água/aglomerante: 0,23 ; 0,25 ; 0,28 ; 0,32 ; 0,37. É sabido que a resistência do concreto é função inversa da relação água/cimento. Com o intuito de observar tal efeito da relação água/aglomerante na resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, tal faixa de valores foi estabelecida.

b) Idade: 3, 7, 28 e 63 dias. Tais valores foram escolhidos por serem idades comumente utilizadas em estudos de caracterização mecânica do concreto.

c) Adições (Sílica Ativa): 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. De acordo com DAL MOLIN (1995), os teores usuais para utilização de sílica ativa em concretos de alta resistência abrangem a faixa de 8 a 15%. Segundo KULAKOWSKI (2002), os teores ótimos usuais comumente utilizados em concreto se situam por volta de 10% em relação ao peso de cimento. O intervalo de 0 a 20% de adição foi estabelecido para melhor representar a influência desse material nas propriedades dos concretos de alta resistência com cimentos aluminosos. Os valores expressos foram adotados a fim de obter valores de referência (0%) e valores extremos de adição (20%). Os níveis intermediários foram estabelecidos por equidistância dos extremos e do valor central.

Após a definição dos fatores controláveis, o tamanho ótimo da amostra foi estabelecido, e verificada a normalidade de distribuição. Segundo DAL MOLIN (1995), 03 (três) exemplares para cada ensaio realizado fornecem resultados com confiabilidade para concretos de alta resistência. De acordo com NANNI (apud DAL MOLIN, 1995), esse valor pode ser determinado através da equação apresentada a seguir. Todavia, devido ao alto custo do material, limitações de recursos, além da opção pela realização de duas repetições, foram adotados 02 (dois) exemplares.

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 CV^2}{Er^2}$$

Onde:

Er – erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;

CV – coeficiente de variação da amostra;

$z_{\alpha/2}$ – valor tabelado igual a 1,96 para um nível $\alpha = 5\%$ de significância.

Diante do elevado número de corpos de prova necessários para os ensaios de caracterização, optou-se pelo emprego de uma estratégia de fracionamento de projeto, descrita por MONTGOMERY (1986).

Segundo RIBEIRO e CATEN (2001a), a utilização do Projeto Fatorial Cruzado permite, com maior eficiência, analisar os efeitos de um ou mais fatores controláveis, além dos efeitos das interações entre tais fatores. Este método permite a tomada de observações em determinados pontos do espaço amostral, com conseqüente obtenção das informações mais relevantes ao estudo. Além disso, a utilização do Projeto de Experimentos permite a quantificação e minimização dos efeitos de fatores não controláveis (erros experimentais), e a redução da quantidade de ensaios necessários (RIBEIRO; CATEN, 2001b)

O método de fracionamento, de acordo com MONTGOMERY (1986), é baseado em observações (ensaios) de determinados pontos do espaço amostral. Sendo assim, são obtidas informações relevantes através de um número menor de ensaios, ao passo que o comportamento das variáveis controláveis é mantido. O referido autor define tal método utilizado no estudo como Projeto Fatorial Fracionado somado a pontos axiais e centrais. Tais pontos, quando balanceados de forma adequada, permitem a avaliação dos efeitos produzidos nas variáveis de resposta através da mudança de nível dos fatores controláveis.

Na Figura 4. 1 cada ponto formando o cubo e a estrela identifica uma betonada, que por sua vez representa uma distinta mistura de concreto correspondente a uma determinada combinação de fatores controláveis (relação água/aglomerante x teor de adição). Dessa forma, o método de fracionamento proposto por MONTGOMERY (1986) e adotado para o estudo em questão, permitiu a redução do número de corpos de prova de 400 para 144.

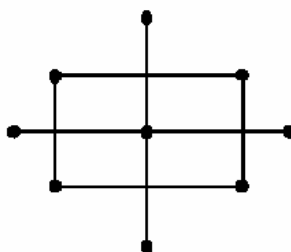


FIGURA 4. 1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PROJETO FATORIAL FRACIONADO

A Tabela 4. 1 apresenta o planejamento dos ensaios, realizados com duas repetições de acordo com o mencionado anteriormente. Os espaços marcados com “XX” referem-se às misturas efetivamente executadas. Já os espaços em branco referem-se às que não foram executadas, entretanto, determinadas através de um modelo matemático. O comportamento dos resultados foi analisado através de análise estatística utilizando Regressão Múltipla Não Linear.

TABELA 4. 1 – PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS – PROJETO FATORIAL CRUZADO

TEOR DE ADIÇÃO (%)	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE				
	0.23	0.25	0.28	0.32	0.37
0	yy		xx		yy
5		xx		xx	
10	xx		xx		xx
15		xx		xx	
20	yy		xx		yy

Observa-se na Tabela 4. 1 que, a princípio, as misturas formadas pela combinação das extremidades não seriam executadas (“YY”). Dessa forma, não seria possível identificar de maneira adequada as interações entre a relação água/aglomerante e o teor de adição no modelo matemático desenvolvido. Através da execução de tais misturas é possível comparar de maneira mais adequada o valor observado com o previsto em modelo.

A aleatorização para a execução dos traços é de significativa importância ao minimizar os efeitos de variáveis como umidade relativa e temperatura que, embora interfiram nos resultados, não podem ser controladas. A execução das misturas foi realizada de acordo com a forma da Figura 4. 1, sendo primeiramente executados os traços correspondentes aos pontos do cubo e em seguida aos pontos da estrela. Finalmente, foram executados os traços que correspondem aos espaços marcados com “YY”. A matriz experimental, com a ordem de execução dos traços está apresentada na Tabela 4. 2.

TABELA 4. 2 – ALEATORIZAÇÃO DA ORDEM DE EXECUÇÃO DOS TRAÇOS

FIGURA	TRAÇOS	DATA MOLDAGEM
CUBO	32SA15(1); 25SA5(1);	08/04/2005
	25SA15(1); 32SA15(1)	11/04/2005
ESTRELA	23SA10(1); 28SA20(1);	11/04/2005
	28SA0(1); 28SA10(1); 37SA10(1)	12/04/2005
CUBO	25SA5(2); 32SA15(2)	12/04/2005
	25SA15(2); 32SA5(2)	13/04/2005
ESTRELA	37SA10(2)	13/04/2005
	23SA10(2); 28SA20(2); 28SA0(2); 28SA10(2)	18/04/2005
EXTREMIDADES	37SA20(1)	18/04/2005
	23SA0(1); 23SA20(1); 37SA0(1); 37SA20(2)	19/04/2005
	23SA0(2); 37SA0(2); 23SA20(2)	26/04/2005

Em relação à nomenclatura utilizada para os traços produzidos, os dois primeiros números referem-se à relação água/aglomerante, os dois últimos ao teor de adição de sílica ativa utilizado. Já o número entre parênteses representa o número da repetição. Sendo assim, como exemplo, o traço 25SA15(1) refere-se à mistura com relação água/aglomerante igual a 0,25, adição de 15% de sílica ativa, e é correspondente aos traços executados durante a primeira repetição.

4. 1. 2 Ensaaios de Microestrutura

Conforme já discutido, as propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna. Com o objetivo de orientar e verificar de maneira extremamente simplificada o comportamento da microestrutura dos concretos de cimentos aluminosos e relacioná-lo ao comportamento mecânico, foram realizadas algumas análises através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários.

4.2 Caracterização dos Materiais

4.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesse estudo foi o Fondu Lafarge, produto classificado como CAC 40, conforme descreve a norma NBR 13847 (1997), e cujas características mecânicas e físicas estão descritas nas tabelas a seguir.

TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CIMENTO ALUMINOSO

CARACTERÍSTICA	VALORES OBTIDOS (MPa)
Resistência à Compressão – 6 horas	47,0
Resistência à Compressão – 24 horas	67,0

FONTE: Dados fornecidos pelo fabricante

TABELA 4.4 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO ALUMINOSO

CARACTERÍSTICA	VALORES OBTIDOS
* Resíduo na peneira ABNT 170 (%)	2,3
Resíduo na peneira ABNT 200 (%)	3,0
Resíduo na peneira ABNT 325 (%)	13,0
* Fluidez a 15 min (%)	80
Área Específica BET (m ² /kg)	322,3
* Tempo de Início de Pega (min)	156
Massa Específica (g/cm ³)	3,19

FONTE: Análise realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/LACTEC

NOTA: * Dados fornecidos pelo fabricante

A caracterização química do cimento está apresentada na Tabela 4.5 e foi determinada por espectroscopia de fluorescência de raios-X realizada no Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR), da Universidade Federal do Paraná. A superfície específica foi obtida através de análise por adsorção de nitrogênio. Já a distribuição granulométrica do cimento foi determinada através do granulômetro à Laser no Departamento de Química do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), e está

apresentada na Figura 4. 2, onde as abscissas correspondem ao tamanho médio das partículas (em μm), e as ordenadas referem-se à porcentagem de material.

TABELA 4. 5 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO ALUMINOSO

CARACTERÍSTICA	VALORES OBTIDOS (%)	ERRO ABSOLUTO
Perda ao Fogo	0,56	-
Al_2O_3	44,09	0,2
CaO	34,56	0,1
Fe_2O_3	11,71	0,07
SiO_2	6,75	0,09
TiO_2	1,96	0,03
Sr	0,23	0,003
P_2O_5	0,13	0,009
Na	<<	-
Mg	<<	-
S	<<	-
K	<<	-
Mn	<<	-

NOTA: << Abaixo do Limite de Detecção.

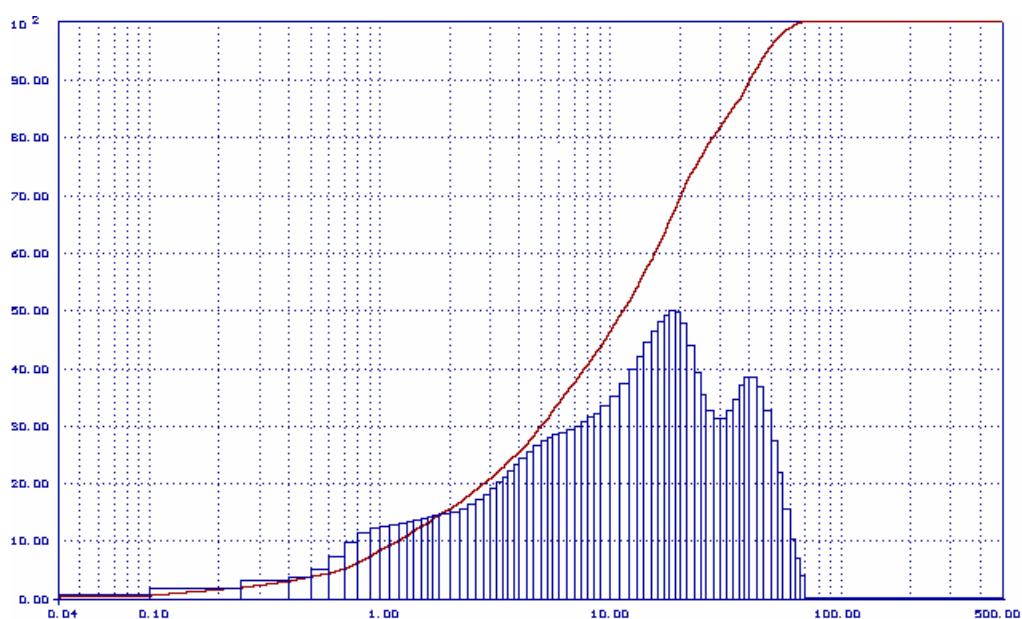


FIGURA 4. 2 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CIMENTO ALUMINOSO

4. 2. 2 Sílica Ativa

A sílica ativa empregada é um material do tipo não densificado, cujas características físicas e químicas encontram-se descritas nas Tabelas 4. 6 e 4. 7.

TABELA 4. 6 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA SÍLICA ATIVA

CARACTERÍSTICA	VALORES OBTIDOS
Massa Específica (g/cm ³)	2,07
Superfície Específica (m ² /kg)	20000
Diâmetro equivalente a 10% de massa acumulada (µm)	4,42
Diâmetro equivalente a 90% de massa acumulada (µm)	20,80
Diâmetro Médio das Partículas (µm)	12,40

FONTE: Análise realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/LACTEC

TABELA 4. 7 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA

COMPOSIÇÃO	TEOR OBTIDO (%)
Perda ao Fogo	3,35
SiO ₂	93,54
Al ₂ O ₃	0,07<LL
Fe ₂ O ₃	0,05<LL
CaO	0,01<LL
K ₂ O	0,80<LL
Na ₂ O	0,12<LL
MgO	0,53
MnO	0,02
TiO ₂	0,04
P ₂ O ₅	0,09

FONTE: Análise por espectroscopia de fluorescência de raios-X, realizada no Laboratório de Minerais e Rochas – LAMIR/UFPR

Assim como para o cimento aluminoso caracterização química da sílica ativa foi determinada por espectroscopia de fluorescência de raios-X realizada no Laboratório de

Minerais e Rochas (LAMIR), da Universidade Federal do Paraná. A superfície específica foi obtida através de análise por adsorção de nitrogênio

A Figura 4. 3 apresenta micrografias de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários obtidas para a sílica ativa.

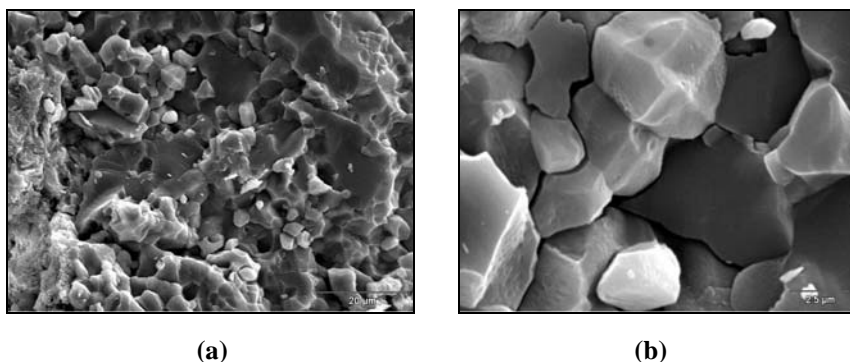


FIGURA 4. 3 – MICROGRAFIA DA SÍLICA ATIVA - (a) AUMENTO DE 1.500x (b) AUMENTO DE 8.000x

A distribuição granulométrica da sílica ativa foi determinada através do granulômetro à Laser no Departamento de Química do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), e está apresentada na Figura 4. 4.

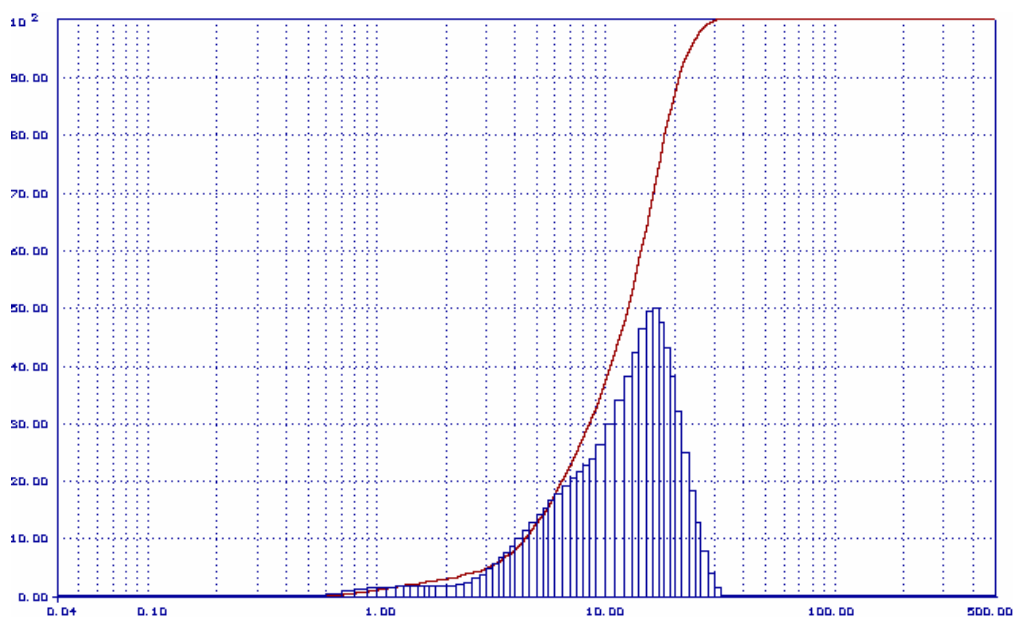


FIGURA 4.4 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA SÍLICA ATIVA

4.2.3 Agregados

O agregado miúdo empregado é de origem quartzosa e suas características encontram-se nas Tabelas 4.8 e 4.9. A distribuição granulométrica do material está apresentada na Figura 4.5.

TABELA 4.8 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO (NBR NM 248/2003)

ABERTURA DA PENEIRA (mm)	% MÉDIA RETIDA	% MÉDIA ACUMULADA
4,8	2,52	2,52
2,4	12,75	15,27
1,2	16,21	31,48
0,6	14,42	45,90
0,3	17,08	62,98
0,15	23,68	86,67
< 0,15	13,30	100,00

FONTE: Análise realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/LACTEC

TABELA 4.9 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

CARACTERÍSTICA	RESULTADOS	MÉTODO DE ENSAIO	LIMITES NBR 7211/83
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8	NBR NM 248/2003	-
Módulo de Finura	2,45	NBR NM 248/2003	-
Graduação (Zona)	3	NBR NM 248/2003	3 (média)
Massa Específica SSS (g/cm ³)	2,63	NBR 9776/87	-
Massa Específica Seca (g/cm ³)	2,61	NBR 9776/87	-
Massa Unitária Solta (g/cm ³)	1,51	NBR 7251/82	-
Absorção (%)	0,42	NBR 9777/87	-
Material Pulverulento (%)	2,48	NBR 7219/87	0,5 a 3,0 %

FONTE: Análise realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/LACTEC

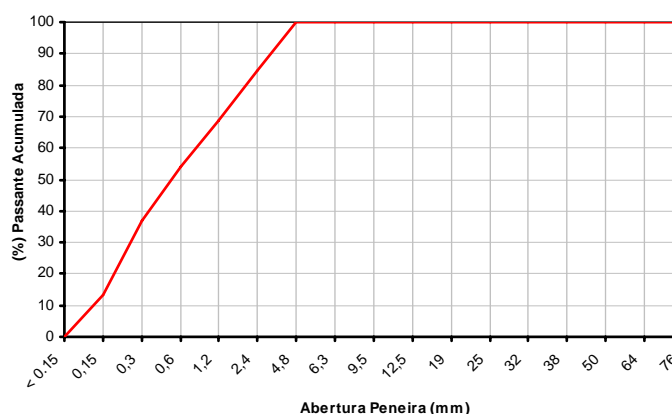


FIGURA 4. 5 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO

Quanto ao agregado graúdo, este material foi selecionado dentre os disponíveis no mercado local, sendo derivado de uma rocha ígnea classificada como um álcali feldspato riolito. No anexo C é descrita a análise petrográfica do agregado graúdo. A Tabela 4. 10 apresenta a composição granulométrica do agregado graúdo, sua distribuição granulométrica é apresentada na Figura 4. 6, e o difratograma de raios-X na Figura 4. 7. Já nas tabelas 4. 11, 4. 12 e 4. 13 encontram-se as características físicas, químicas, e caracterização cristalográfica desse material, respectivamente.

TABELA 4. 10 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO (NBR NM 248/2003)

ABERTURA DA PENEIRA (mm)	% MÉDIA RETIDA	% MÉDIA ACUMULADA
25,0	-	-
19,0	2,48	2,48
12,5	47,66	50,14
9,5	34,68	84,82
6,3	14,07	98,88
4,8	0,77	99,65
< 4,8	0,09	99,75

FONTE: Análise realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/LACTEC

TABELA 4. 11 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

CARACTERÍSTICA	RESULTADOS	MÉTODO DE ENSAIO	LIMITES NBR 7211/83
Dimensão Máxima Característica (mm)	19,00	NBR NM 248/2003	-
Módulo de Finura	6,58	NBR NM 248/2003	-
Absorção (%)	0,26	NBR 9937/87	-
Massa Específica SSS (g/cm ³)	2,61	NBR 9937/87	-
Massa Específica Seca (g/cm ³)	2,60	NBR 9937/87	-
Massa Unitária Solta (g/cm ³)	1,35	NBR 7251/82	-
Massa Unitária Compactada (g/cm ³)	1,47	NBR 7810/83	-
Material Pulverulento (%)	0,40	NBR 7219/87	≤ 3,0 %
Abrasão Los Angeles (%)	11	NBR NM 51/2001	≤ 50 %
Índice de Forma	2,45	NBR 7809/82	-

FONTE: Análise realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/LACTEC

TABELA 4. 12 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO AGREGADO GRAÚDO

COMPOSIÇÃO	TEOR OBTIDO (%)
Perda ao Fogo	0,85
SiO ₂	74,25
Al ₂ O ₃	12,56
Fe ₂ O ₃	1,96
CaO	0,33
K ₂ O	5,02
Na ₂ O	5,03
MgO	0,07
MnO	0,03
TiO ₂	0,09
P ₂ O ₅	0,01

FONTE: Análise por espectroscopia de fluorescência de raios X, realizada no Laboratório de Minerais e Rochas – LAMIR/UFPR

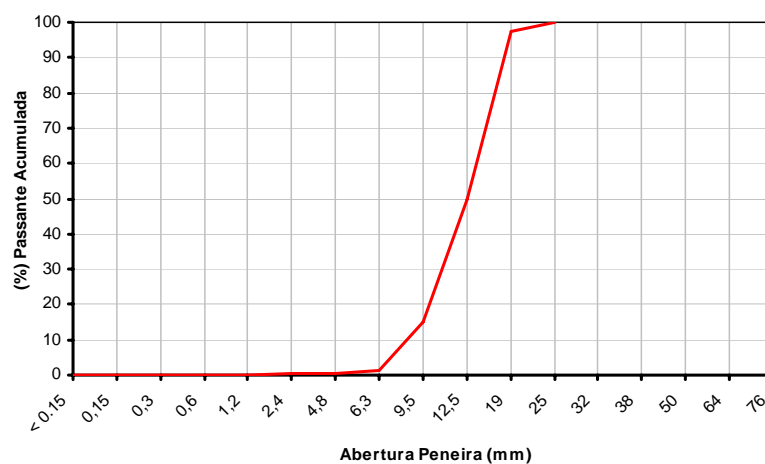


FIGURA 4. 6 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO

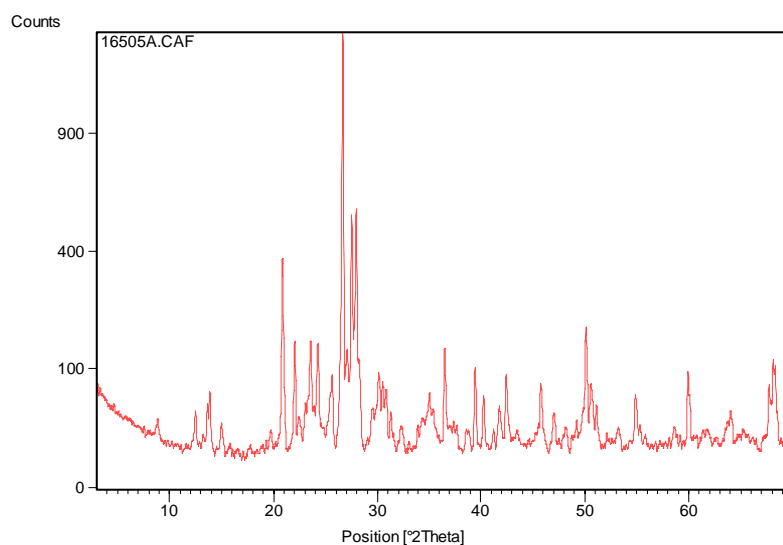


FIGURA 4. 7 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO AGREGADO GRAÚDO

TABELA 4. 13 – CARACTERIZAÇÃO CRISTALOGRÁFICA DO AGREGADO GRAÚDO

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA
Quartzo	SiO_2
Ortoclásio	$\text{K(Al,Fe)Si}_3\text{O}_8$
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Sericita	$(\text{K}_{0.727}\text{Na}_{0.170}\text{Ca}_{0.011})(\text{Al}_{0.933}\text{Fe}_{0.016}\text{Mg}_{0.011})_2(\text{Si}_{0.782}\text{Al}_{0.221}\text{Ti}_{0.005})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Caolinita	$\text{Al}_2(\text{OH})_4(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$
Aegirina	$\text{NaFeSi}_3\text{O}_6$

4. 2. 4 Água

A água utilizada na produção do concreto foi proveniente da rede pública de abastecimento.

4. 2. 5 Aditivos

De acordo com SCRIVENER (2001), conforme mencionado no item 3.6, concretos produzidos com cimentos aluminosos tendem a ser mais tixotrópicos e, dessa forma, parecem ter maior rigidez antes do adensamento da mistura. Entretanto, tais materiais têm características de plasticidade e trabalhabilidade comparáveis a concretos produzidos com cimento Portland. O autor comenta que os tipos clássicos de superplastificantes utilizados para concretos de cimento Portland (lignossulfatos e polinaftalenos sulfonados) não apresentam efeitos significativos em misturas de cimento aluminoso. Já os chamados aditivos superplastificantes de terceira geração (policarboxilatos) proporcionam melhores resultados, porém seu desempenho é influenciado por diversos fatores como tempo de mistura, momento da adição do aditivo no processo de mistura, teor de aditivo, entre outros, podendo reduzir significativamente o tempo de pega do concreto correspondente.

Devido aos diversos fatores que influenciam o comportamento de um aditivo redutor de água, faz-se necessária a realização de estudos prévios para verificação da compatibilidade entre esses materiais, o cimento aluminoso e a sílica ativa. Entretanto, segundo AİTCIN (2000), algumas combinações podem produzir ótimos resultados em pastas e não apresentarem bom desempenho quando aplicadas em concreto devido às diferentes condições de mistura.

A despeito dos diversos tipos de aditivos mencionados no item 3.6, foram selecionados cinco tipos distintos de aditivos superplastificantes comumente utilizados na produção de concretos de alta resistência contendo cimento Portland para análise de compatibilidade com cimentos aluminosos. Dentre tais aditivos, três são compostos à base de policarboxilatos e os outros dois compostos à base de polinaftalenos sulfonados.

De acordo com AİTCIN (2000) são usualmente utilizados dois métodos de análise da compatibilidade e avaliação dos aditivos quanto ao seu poder fluidificante e alterações de fluidez de pastas de cimento com o tempo, a saber o método do cone de “mini slump” ou miniabatimento, desenvolvido por KANTRO (1980), e o método do funil de Marsh (NBR 7682/83). Segundo o referido autor, o método de miniabatimento requer uma quantidade menor de material, entretanto, a pasta é avaliada em comportamento estático. Já através do método do funil de Marsh a pasta é analisada em condições dinâmicas.

AİTCIN (2000) comenta que o uso simultâneo de ambos os métodos é interessante ao permitir a análise de diferentes parâmetros reológicos predominantes em cada um deles. Sendo assim, primeiramente foi realizado o ensaio de miniabatimento utilizando os cinco aditivos superplastificantes, cujas características estão apresentadas na Tabela 4. 14.

TABELA 4. 14 – CARACTERÍSTICAS DOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

ADITIVO-COMPOSIÇÃO	TEOR DE SÓLIDOS (%)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)
A - Policarboxilato	32,0	1,08
B - Policarboxilato	30,0	1,09
C - Policarboxilato	30,0	1,05
D – Polinafaleno Sulfonado	38,0	1,20
E – Polinafaleno Sulfonado	42,0	1,20

FONTE: Dados fornecidos pelos respectivos fabricantes

Para o ensaio de miniabatimento foram determinadas duas relações água/cimento - 0,23 e 0,37 – referentes aos limites da faixa de valores estabelecidos para a produção das misturas de concreto, além de quatro teores diferentes de aditivo (em % de sólidos) iguais a 0,1 ; 0,2 ; 0,3 e 0,4 (em relação ao peso de cimento). A partir dos resultados obtidos no ensaio de miniabatimento foram selecionados os dois aditivos que apresentaram melhor desempenho (A e B) para análise através do método do funil de Marsh.

Segundo AİTCIN (2000), o ensaio do funil de Marsh é realizado com relação água/cimento ou água/aglomerante igual a 0,35. Entretanto, outros valores podem ser tomados com o objetivo de analisar o material sob condições similares às da pasta do

concreto de alta resistência. Para o estudo em questão optou-se pela utilização de duas relações água/aglomerante iguais a 0,25 e 0,35., além de dois teores de adição em relação ao peso de cimento iguais a 0 e 10%.

Finalmente, concluiu-se que o aditivo A, a base de policarboxilatos, com teor de sólidos igual a 32% e massa específica $1,08 \text{ g/cm}^3$, apresentou melhor desempenho, sendo então selecionado para a execução das misturas de concreto.

4.3 Proporcionalamento dos Materiais

A obtenção das funções e conseqüente proporcionalamento dos materiais constituintes do concreto foi realizada com base no método proposto por AİTCIN (2000). ALVES (2000) ao analisar diversos procedimentos de dosagem para concretos de alta resistência concluiu que tal método apresenta consumo de cimento inferior quando comparado a outros métodos de dosagem. Estudos de MENDES (2002) concluem que esse método apresenta o segundo menor consumo de cimento ao ser comparado com outros métodos para a produção de concreto de alta resistência, além de considerar características específicas dos agregados no cálculo da quantidade de materiais, como por exemplo a forma do agregado graúdo para estimativa da demanda desse material por m^3 de concreto.

De acordo com AİTCIN (2000), uma dificuldade na dosagem de concretos de alta resistência é a determinação do teor de água a ser utilizado para obtenção da trabalhabilidade adequada. A trabalhabilidade é influenciada por diversos fatores, como quantidade de água inicial na mistura, tipo e reatividade do cimento, teor de aditivo e adições, além da compatibilidade entre cimentos e aditivos. O autor sugere uma abordagem simplificada, na qual o teor de água da mistura é relacionado ao ponto de saturação do aditivo superplastificante presente no sistema. Para o estudo em questão optou-se por uma adequação do método proposto por AİTCIN (2000). Conforme mencionado em 3.7, na produção de concretos contendo cimentos aluminosos o limite

para relação água/cimento deve ser respeitado (abaixo de 0,4), além do consumo mínimo de cimento (400 kg/m^3). Caso fossem adotados os valores sugeridos pelo referido autor, não seria possível atender ao consumo mínimo de cimento estabelecido, portanto, as misturas foram realizadas com teores de água variando entre 140 e 145 kg/m^3 . Além disso, na determinação dos traços foi considerada a parcela de água presente no aditivo como constituinte na água total da mistura e, conseqüentemente, manteve-se fixa a relação água/aglomerante previamente estabelecida. Os traços obtidos, em massa, encontram-se na Tabela 4. 15, e estão detalhados no ANEXO A.

TABELA 4. 15 – TRAÇOS DE CONCRETO EM MASSA

Traço	a/agl	Teor Sílica (%)	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Abatimento (mm)	Ar (%)	Massa Específica (kg/m^3)
23SA0 (1)	0,23	0	1,00	2,00	1,59	200	1,0	2464,5
23SA0 (2)	0,23	0	1,00	2,00	1,59	210	1,0	2483,6
23SA10 (1)	0,23	10	1,00	1,82	1,26	255	0,4	2491,8
23SA10 (2)	0,23	10	1,00	1,85	1,25	265	0,3	2493,8
23SA20 (1)	0,23	20	1,00	2,50	1,90	250	1,1	2421,2
23SA20 (2)	0,23	20	1,00	2,52	1,90	245	0,4	2468,3
25SA5 (1)	0,25	5	1,00	1,88	1,45	220	1,0	2487,3
25SA5 (2)	0,25	5	1,00	1,89	1,39	230	1,0	2484,8
25SA15 (1)	0,25	15	1,00	2,10	1,52	250	0,3	2531,2
25SA15 (2)	0,25	15	1,00	2,10	1,52	255	0,4	2493,7
28SA0 (1)	0,28	0	1,00	2,01	1,60	220	1,3	2464,5
28SA0 (2)	0,28	0	1,00	2,00	1,60	220	0,9	2477,2
28SA10 (1)	0,28	10	1,00	2,22	1,80	225	0,6	2485,3
28SA10 (2)	0,28	10	1,00	2,22	1,75	250	0,7	2477,2
28SA20 (1)	0,28	20	1,00	2,50	1,92	235	0,3	2473,6
28SA20 (2)	0,28	20	1,00	2,50	1,91	265	0,4	2461,9
32SA5 (1)	0,32	5	1,00	2,32	1,91	220	0,4	2497,1
32SA5 (2)	0,32	5	1,00	2,32	1,91	230	0,5	2456,8
32SA15 (1)	0,32	15	1,00	2,58	2,15	220	1,0	2477,1
32SA15 (2)	0,32	15	1,00	2,60	2,08	230	1,1	2459,4
37SA0 (1)	0,37	0	1,00	2,00	1,60	220	1,0	2459,4
37SA0 (2)	0,37	0	1,00	2,00	1,59	230	1,0	2484,9
37SA10 (1)	0,37	10	1,00	2,84	2,45	220	1,1	2459,4
37SA10 (2)	0,37	10	1,00	2,83	2,49	210	1,0	2477,2
37SA20 (1)	0,37	20	1,00	2,41	1,77	265	0,5	2426,3
37SA20 (2)	0,37	20	1,00	2,41	1,83	230	1,3	2436,5

4. 3. 1 Produção e preparo dos corpos de prova

Através dos ensaios de funil de Marsh foram obtidos os pontos de saturação do aditivo para as pastas com relações água/aglomerante iguais a 0,25 e 0,35. AITCIN (2000) define como ponto de saturação de um aditivo aquele a partir do qual qualquer aumento na dosagem de superplastificante não produz efeito na reologia da pasta. Segundo o referido autor, a dosagem de superplastificante correspondente a esse ponto é chamada de dosagem de saturação. Para o estudo em questão devido à falta de conhecimento do comportamento das misturas de concreto contendo cimentos aluminosos, não foi estabelecido o abatimento do tronco de cone para controle da trabalhabilidade, entretanto, optou-se pela dosagem de saturação na produção de todas as misturas de concreto. Para os traços de concreto com relações água/aglomerante iguais a 0,23; 0,25 e 0,28 foi tomado o valor obtido através do ensaio de funil de Marsh com relação água/aglomerante igual a 0,25. Já para os traços de concreto com relações iguais a 0,32 e 0,37, foi utilizado o valor obtido para relação água/aglomerante igual a 0,35. A produção do concreto seguiu os critérios de aleatorização expostos no item 4.1.

A execução das misturas foi realizada em betoneira de eixo inclinado, após imprimação da mesma com material equivalente a 10% do traço de concreto correspondente. Após alguns estudos prévios de dosagem foi estabelecida a seguinte ordem de colocação dos materiais na betoneira:

- 100% do agregado graúdo;
- 30% de água;
- Mistura por 1 minuto;
- 100% de cimento, 70% de água e aditivo;
- Mistura por 9 minutos;
- 100% de agregado miúdo e 100% da sílica ativa;
- Mistura por 10 minutos.

Transcorrido o período de mistura, para análise das características do concreto fresco, foram realizados os seguintes ensaios, cujos resultados estão apresentados no ANEXO A:

- Abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, 1998);
- Determinação do teor de ar incorporado (NBR NM 47, 2002);
- Determinação da massa específica no estado fresco (NBR 9833, 1987).

Conforme observado por outros pesquisadores (AGUADO e OLIVEIRA apud LOPES, 1999; MENDES, 2002), o tempo de mistura para o concreto de alta resistência é superior ao tempo de mistura de concretos convencionais. Devido ao comportamento tixotrópico esse material requer maior energia de amassamento.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) para os ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 5738 (2003). O processo de adensamento adotado foi o mecânico, através do vibrador de imersão, com agulha de 25 mm.

4.3.2 Cura e armazenamento

Os corpos de prova foram cobertos com filme de PVC após a moldagem, com o intuito de evitar a perda de água superficial, e foram mantidos em ambiente de laboratório durante as primeiras 24 horas de hidratação. Após esse período foram armazenados em câmara úmida com umidade relativa de aproximadamente 95% e temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ até a data de ensaio.

4. 4 Metodologia para execução dos ensaios

4. 4. 1 Ensaio Mecânicos

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados segundo as orientações contidas na norma técnica NBR 5739 (1994). A execução dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiu as prescrições estabelecidas na norma NBR 7222 (1994).

Conforme já mencionado, os resultados obtidos para concretos de alta resistência submetidos a ensaios de resistência à compressão axial podem ser influenciados pela capacidade resistente do material utilizado para capeamento, todavia tais valores não são prejudicados quando um material adequado é utilizado. Este material é ideal quando possui resistência e propriedades semelhantes ao concreto, pois dessa forma não há tendência ao fendimento, sendo possível obter uma distribuição de tensões uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova. Segundo BICKLEY et al. (apud AİTCIN, 2000), é fundamental que os ensaios com concreto de alta resistência sejam executados adequadamente e ofereçam segurança quanto aos resultados obtidos, caso contrário, a especificação desse material é desnecessária.

A influência do material de capeamento é muito maior em concretos de alta resistência, onde existe maior influência do coeficiente de Poisson do material utilizado. Estudos de NEVILLE (1997) comprovam que para concretos com resistência igual a 48 MPa, o capeamento de alta resistência resulta em valores 7 a 11% mais altos do que com capeamentos mais fracos, e em concretos com resistência igual a 69 MPa, tais valores podem chegar a 17%.

Segundo PETERMAN e CARRASQUILLO (1986), o capeamento deve ser feito com compostos de resistência mais alta, pois os convencionais de enxofre não suportam resistências superiores a 70 MPa. Em concreto convencional esses compostos apresentam

resistência suficiente para assegurar com que a ruptura ocorra primeiramente no concreto, quando submetido ao ensaio de resistência à compressão.

Atualmente, estão sendo utilizados compostos de capeamento com resistência à compressão na faixa de 60 a 70 MPa. Tais valores ainda são considerados baixos quando comparados aos obtidos para resistência à compressão de concretos de alta resistência. Todavia, são obtidos em condições de ensaio que diferem significativamente das condições reais de trabalho dos compostos de capeamento, com 2 a 3 mm de espessura (NEVILLE, 1997). Neste caso, o composto de capeamento é comprimido em um estado confinado, e segundo LESSARD e AÏTCIN (1992), materiais nessa situação exibem resistência à compressão aparente muito maior do que os não confinados. Dessa forma, os compostos de capeamento de alta resistência podem ser utilizados em ensaios para concreto de alta resistência com resistência à compressão superior a 70 MPa.

Quando a Resistência à Compressão ou Módulo de Deformação do material de capeamento forem menores que os do concreto, as cargas aplicadas através do capeamento não serão transmitidas uniformemente, gerando grande variabilidade nos resultados. Para evitar tais dispersões nos resultados, diversas soluções alternativas têm sido apresentadas como soluções viáveis: anel metálico preenchido com um disco de poliuretano ou neoprene (CARRASQUILLO e CARRASQUILLO, 1988); planificação dos topos com serra (FIP/CEB, 1990); utilização de calços como berço, sistema de capeamento confinado, proposto por JONHSON e MIRZA (1995) e MIRZA e JONHSON (1996); método da Caixa de Areia (BOULAY e DE LARRARD, 1993; BOULAY, 1996); entre outros.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de caracterização mecânica nesse trabalho inicialmente deveriam ter seus topos planificados com serra, entretanto, durante a fase de estudos de dosagem foi observado alto desvio padrão para os ensaios mecânicos. Sendo assim, optou-se pelo capeamento com fina camada de enxofre após a planificação dos topos, reduzindo, dessa forma, a dispersão dos resultados.

4. 4. 2 Ensaios de Microestrutura

Segundo SARKAR (1992), as técnicas de caracterização que podem ser usadas para o estudo da microestrutura são divididas em dois grandes grupos, a saber:

- Técnicas de observação direta por microscopia óptica ou microscopia eletrônica;
- Técnicas de interpretação indireta, que incluem a porosimetria de mercúrio, análise por difração de raios-X e métodos térmicos.

Com o objetivo de verificar simplificadaamente o comportamento das fases (agregado, matriz e zona de transição) do concreto de alta resistência com cimentos aluminosos e distintos teores de adição e relação água/aglomerante foi realizada análise através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários. No preparo das amostras foram utilizados os corpos de prova submetidos aos ensaios mecânicos. Tais amostras foram preparadas com o uso de acetona e fina película de ouro, visando uma qualidade adequada da imagem. Os ensaios de microestrutura foram realizados no Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Considerações Iniciais

O conjunto de métodos científicos para a coleta, organização, análise e apresentação de dados, além da obtenção de conclusões válidas que dêem suporte à tomada de decisões baseadas em tais análises, constitui a disciplina Estatística. Os conceitos estatísticos são fundamentais ao planejamento, execução e análise de um programa experimental.

Segundo RIBEIRO e CATEN (2001), o uso de um projeto de experimentos baseado em conceitos estatísticos proporciona a estruturação dos ensaios, na qual os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador são atingidos de maneira eficiente. Além disso, esse método pode contribuir em outros aspectos, como:

- redução do tempo de coleta de dados;
- redução do custo de coleta de dados;
- organização e consolidação dos dados;
- agilidade no processamento dos dados;
- maior quantidade de informações extraídas dos dados;
- precisão na análise dos dados;
- apresentação adequada dos resultados.

Serão analisados nesse trabalho os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, anteriormente descritos no Capítulo 4. Para cada ensaio é realizada uma análise estatística de todos os traços produzidos. O objetivo para o emprego de análises estatísticas no tratamento de dados é verificar o efeito dos diferentes teores de adição, relação água/aglomerante e idade nas propriedades do concreto, e se tais diferenças encontradas são significativas para cada propriedade analisada. Como ferramenta para a análise estatística foi empregada regressão múltipla

não linear, cujos resultados foram apresentados através de análises de variância (ANOVA), modelos matemáticos e gráficos das curvas dos modelos obtidos.

A análise de variância, de acordo com RIBEIRO e CATEN (2001), verifica a significância entre as médias dos grupos através da relação de variabilidade das médias entre os diversos grupos e da variabilidade das observações dentro dos mesmos. Segundo os autores, a hipótese de nulidade é a de que as médias são todas iguais. Todas as hipóteses para o estudo em questão foram testadas com um nível de confiança de 95%, ou seja, existem apenas 5% de probabilidade de erro.

5. 2 Compatibilidade entre Cimento e Aditivos

A análise da compatibilidade entre o cimento aluminoso, os aditivos superplastificantes e a sílica ativa é de extrema importância, pois são diversos os fatores que influenciam o comportamento desses materiais. Nesse trabalho foram utilizados dois métodos de verificação da compatibilidade, o método do cone de miniabatimento (KANTRO, 1980) e o método do funil de Marsh (NBR 7682/83), conforme discutido no item 4.2. Segundo AİTCIN (2000), o uso simultâneo de ambos os métodos permite a análise de diferentes parâmetros reológicos predominantes em cada um deles.

O critério para verificação da compatibilidade entre cimento e aditivos do método do cone de miniabatimento é baseado na perda de abatimento em função do tempo de hidratação da pasta. Misturas que são caracterizadas por uma alta taxa de perda de abatimento em função do tempo são ditas incompatíveis ou têm menor eficiência. Além disso, é possível comparar o desempenho de diferentes aditivos ao analisar-se a área de espalhamento da pasta de cimento em função do tempo de hidratação.

O ensaio de miniabatimento foi realizado utilizando os cinco aditivos superplastificantes, cujas características estão apresentadas na Tabela 4. 14. Para esse ensaio foram utilizadas duas relações água/cimento (0,23 e 0,37), que representam os extremos da faixa de valores estabelecidos para a produção das misturas de concreto.

Dessa forma, optou-se por não utilizar adição de sílica ativa na realização desse ensaio. Além disso, foram estabelecidos para análise quatro teores diferentes de aditivo (em % de sólidos) iguais a 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4, todos em relação ao peso de cimento.

Os aditivos D e E (polinaftalenos sulfonados) mostraram ser incompatíveis com o cimento aluminoso ou de menor eficiência em relação aos outros tipos, dentro da faixa de teores analisados. Para tais materiais, ao serem realizados os ensaios utilizando as duas relações água/cimento e os quatro teores estabelecidos, não houve espalhamento da pasta de cimento.

Quando utilizados os aditivos A, B e C (policarboxilatos), houve espalhamento da pasta, a qual apresentou, em geral, perda reduzida de abatimento em função do tempo. Tal efeito pode ser observado nas figuras apresentadas a seguir.

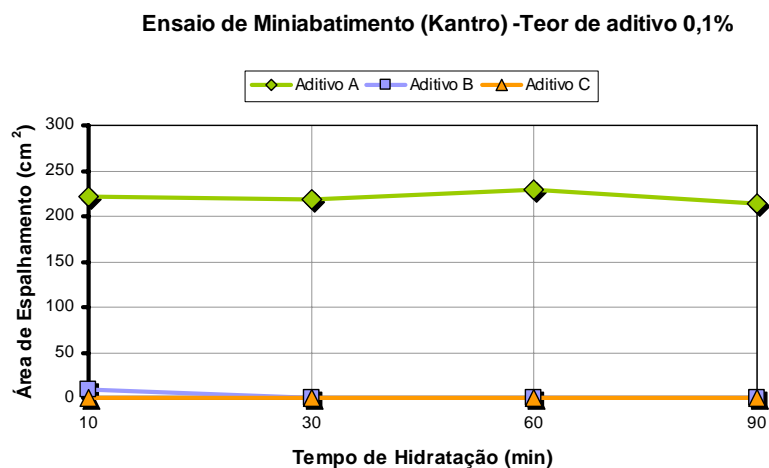


FIGURA 5.1 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)

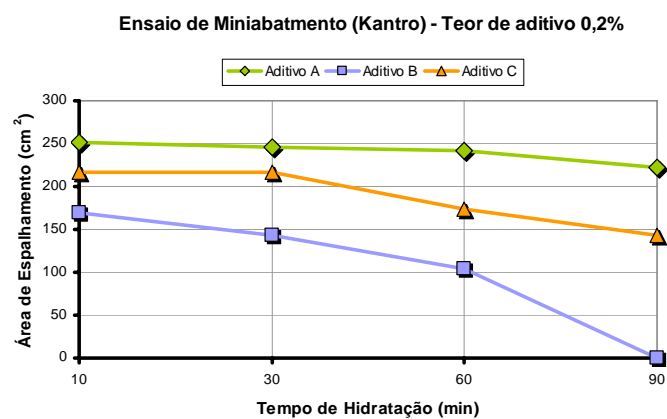


FIGURA 5. 2 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)

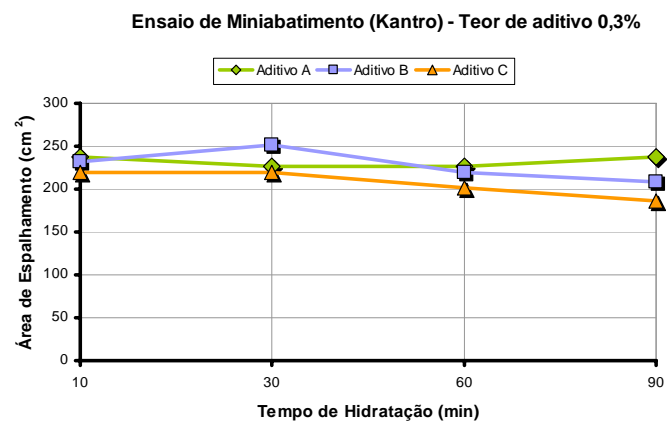


FIGURA 5. 3 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)

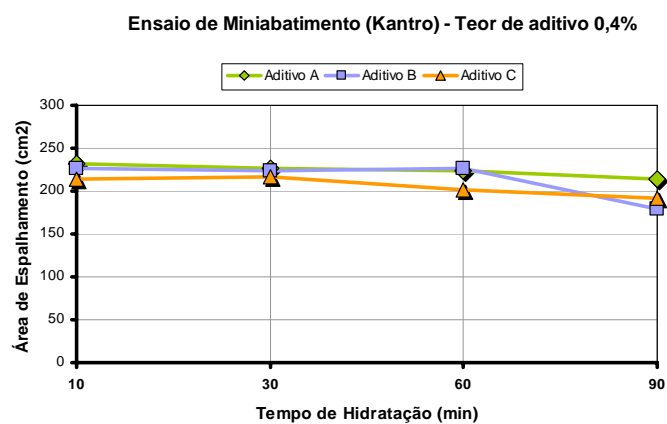


FIGURA 5. 4 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,23)

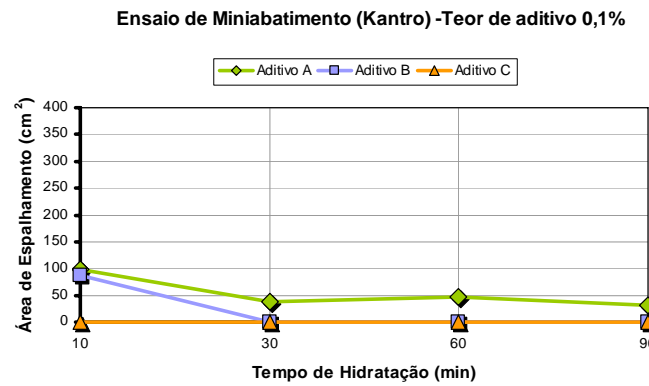


FIGURA 5. 5 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)

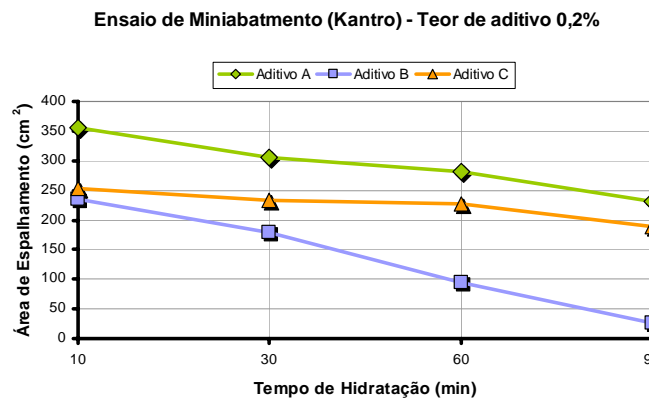


FIGURA 5. 6 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)

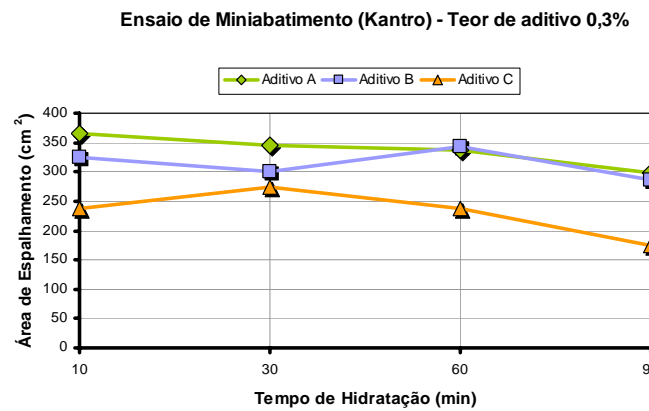


FIGURA 5. 7 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)

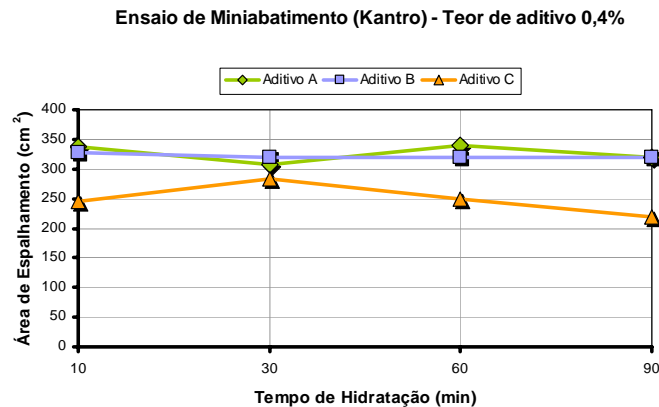


FIGURA 5. 8 – ÁREA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO (A/C = 0,37)

A partir dos resultados obtidos é possível observar que os aditivos A e B apresentaram melhor desempenho em relação ao aditivo C, proporcionando maior área de espalhamento em função do tempo de hidratação. Portanto, foram selecionados para análise através do método do funil de Marsh.

AÍTCIN (2000) recomenda a realização do ensaio de fluidez através do funil de Marsh utilizando relação água/cimento ou água/aglomerante igual a 0,35. Entretanto, outros valores podem ser tomados, quando se deseja analisar os materiais sob condições similares às da pasta correspondente às misturas de concreto. Nesse trabalho foram utilizadas duas relações água/aglomerante iguais a 0,25 e 0,35. O objetivo inicial da análise através do método do funil de Marsh foi a escolha do aditivo que apresentasse o melhor desempenho e que, dessa forma, viria a ser utilizado na produção das misturas de concreto. Sendo assim, primeiramente foram realizados os ensaios com relação água/aglomerante igual a 0,35 e teores de sílica ativa iguais a 0 e 10%. Como na produção de concreto seriam utilizados cinco valores distintos para relação água/aglomerante, além de cinco teores de adição de sílica ativa, optou-se por fixar este último em 10%, ou seja, o valor central da matriz de planejamento dos ensaios, além da pasta de referência, sem adição de sílica ativa. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 5. 9 e 5. 10.

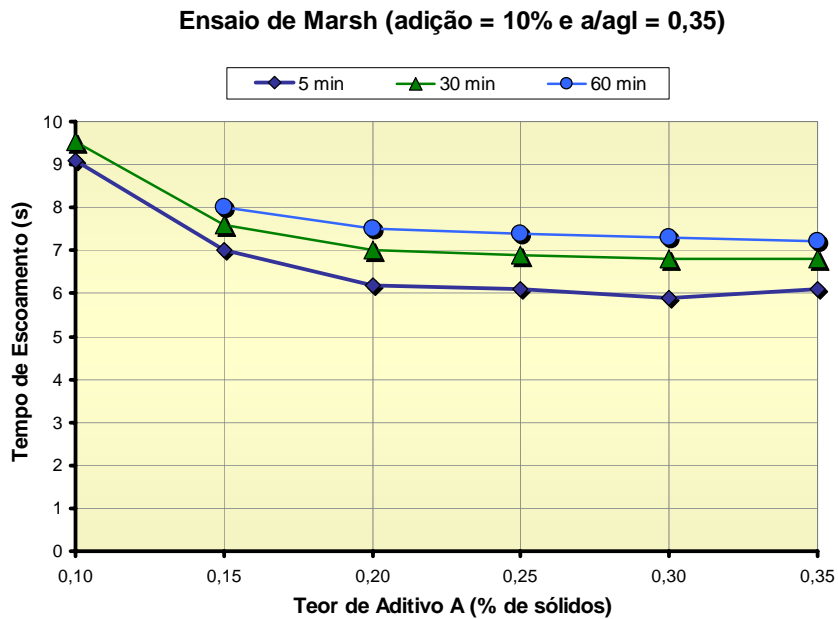
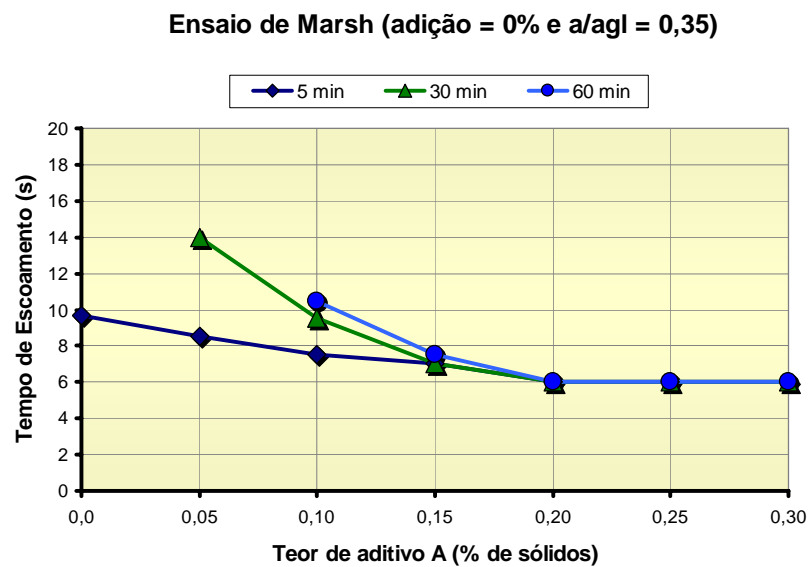


FIGURA 5.9 – TEMPO DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ADITIVO A

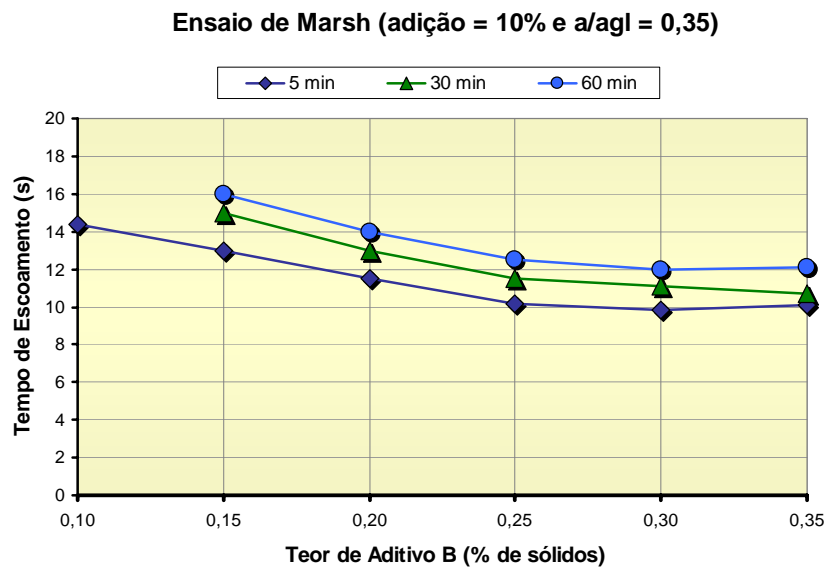
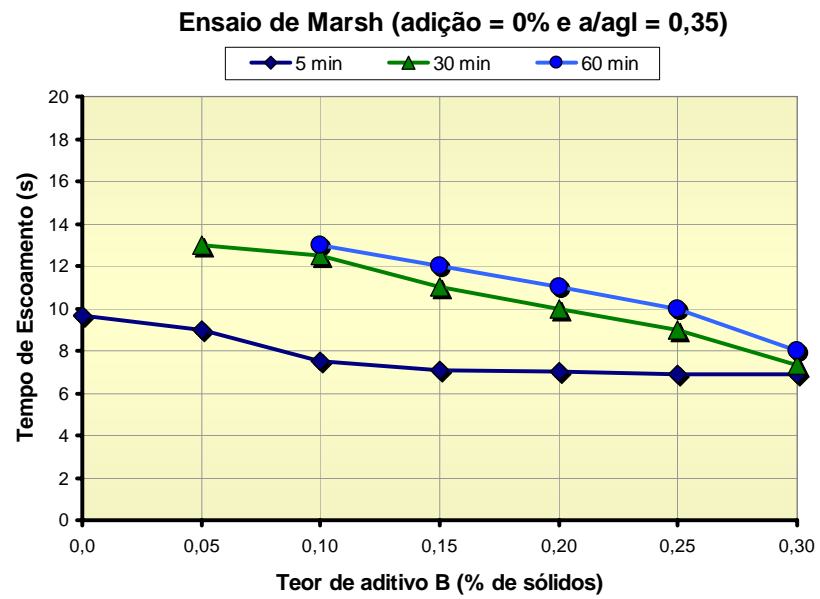


FIGURA 5. 10 – TEMPO DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ADITIVO B

Através das curvas obtidas observa-se que o aditivo A apresentou um desempenho melhor em relação ao aditivo B, quando comparado o tempo de escoamento em função do teor de material. Sendo assim, o aditivo A foi escolhido para a produção das misturas de concreto.

O ponto de saturação é caracterizado pela mudança de inclinação das linhas que compõem os gráficos apresentados, ou seja, a interseção entre tais linhas. O segundo objetivo da realização dos ensaios de fluidez através do método do funil de Marsh é a determinação do ponto de saturação do aditivo, ou seja, o ponto a partir do qual qualquer aumento na dosagem de superplastificante não produz efeito na reologia da pasta. Foram obtidos dois pontos de saturação para o aditivo superplastificante do tipo A, um para relação água/aglomerante igual a 0,35 (0,20% em teor de sólidos totais) e o outro para relação água/aglomerante 0,25 (0,25% em teor de sólidos totais), ambos com 10% de adição de sílica ativa., como é possível observar nas Figuras 5. 11 e 5. 12.

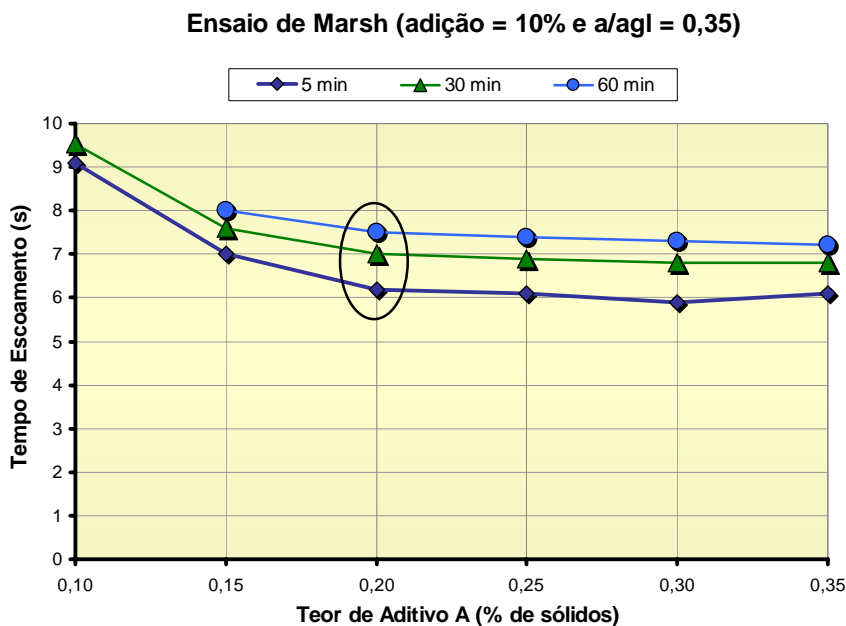


FIGURA 5. 11 – PONTO DE SATURAÇÃO DO ADITIVO A – RELAÇÃO A/AGL IGUAL A 0,35

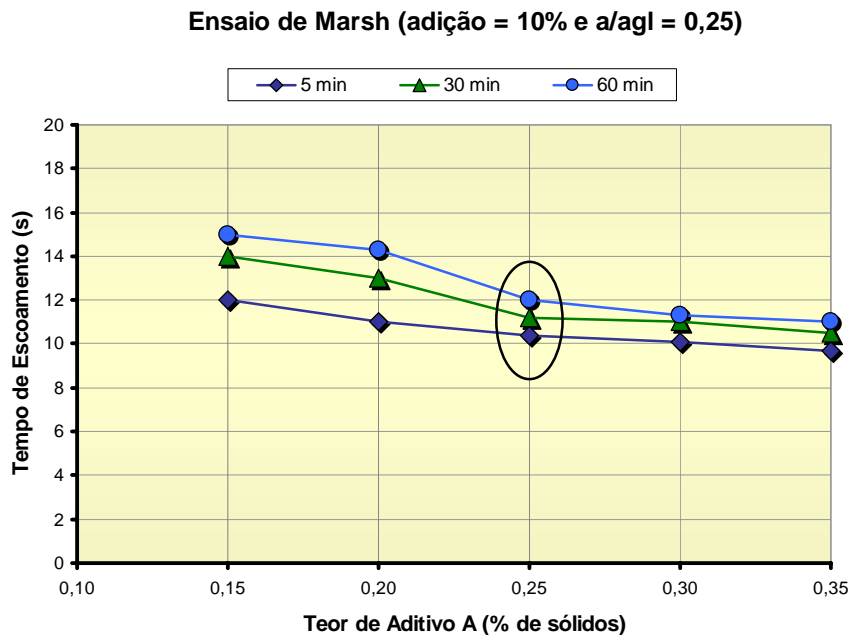


FIGURA 5. 11 – PONTO DE SATURAÇÃO DO ADITIVO A – RELAÇÃO A/AGL IGUAL A 0,25

A realização de ensaios de fluidez através do método do funil de Marsh para todos os teores de adição e relações água/aglomerante adotados seria o ideal. Todavia, para essa pesquisa limitou-se tal abordagem devido ao custo dos materiais, além do tempo disponível. Dessa forma, para a produção das misturas de concreto com relações água/aglomerante iguais a 0,23, 0,25 e 0,28, foi utilizado o valor obtido para o ponto de saturação através dos ensaios realizados com relação água/aglomerante igual a 0,25. Já para os traços de concreto com relações iguais a 0,32 e 0,37, o valor tomado foi o obtido para os ensaios realizados com relação água/aglomerante igual a 0,35. Ambos com adição de 10% de sílica ativa em relação ao peso de cimento.

5.3 Resistência à Compressão Axial

As Tabelas 5. 1 e 5. 2 a seguir apresentam os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial. Cada valor corresponde à média de quatro corpos de prova provenientes de duas misturas realizadas em dias diferentes. Nessa tabela também constam o desvio padrão e o coeficiente de variação. No ANEXO B podem ser encontrados os valores individuais dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial.

TABELA 5. 1 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

TRAÇO	IDADE			
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	63 DIAS
23SA0	Média = 48,9	Média = 62,1	Média = 60,5	Média = 67,1
	Desvio Padrão = 7,69	Desvio Padrão = 2,39	Desvio Padrão = 7,51	Desvio Padrão = 7,03
	CV (%) = 15,71	CV (%) = 3,84	CV (%) = 12,41	CV (%) = 10,48
23SA10	Média = 62,5	Média = 65,1	Média = 68,1	Média = 82,5
	Desvio Padrão = 5,88	Desvio Padrão = 8,20	Desvio Padrão = 10,42	Desvio Padrão = 3,27
	CV (%) = 9,41	CV (%) = 12,60	CV (%) = 15,30	CV (%) = 3,96
23SA20	Média = 57,1	Média = 61,3	Média = 65,4	Média = 70,3
	Desvio Padrão = 2,17	Desvio Padrão = 3,60	Desvio Padrão = 5,67	Desvio Padrão = 0,52
	CV (%) = 3,80	CV (%) = 5,87	CV (%) = 8,68	CV (%) = 0,74
25SA5	Média = 61,6	Média = 63,6	Média = 69,5	Média = 74,0
	Desvio Padrão = 2,65	Desvio Padrão = 6,63	Desvio Padrão = 1,14	Desvio Padrão = 3,45
	CV (%) = 4,30	CV (%) = 10,43	CV (%) = 1,64	CV (%) = 4,65
25SA15	Média = 59,9	Média = 65,0	Média = 65,6	Média = 78,0
	Desvio Padrão = 6,73	Desvio Padrão = 3,18	Desvio Padrão = 6,95	Desvio Padrão = 2,74
	CV (%) = 11,25	CV (%) = 4,89	CV (%) = 10,59	CV (%) = 3,52
28SA0	Média = 54,1	Média = 62,8	Média = 59,8	Média = 62,2
	Desvio Padrão = 1,79	Desvio Padrão = 8,38	Desvio Padrão = 5,35	Desvio Padrão = 5,41
	CV (%) = 3,31	CV (%) = 13,35	CV (%) = 8,95	CV (%) = 8,70
28SA10	Média = 61,4	Média = 66,0	Média = 66,0	Média = 77,7
	Desvio Padrão = 8,52	Desvio Padrão = 14,51	Desvio Padrão = 13,62	Desvio Padrão = 7,60
	CV (%) = 13,90	CV (%) = 21,97	CV (%) = 20,65	CV (%) = 9,78

TABELA 5. 2 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

TRAÇO	IDADE			
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	63 DIAS
28SA20	Média = 54,5	Média = 58,1	Média = 71,0	Média = 71,6
	Desvio Padrão = 6,15	Desvio Padrão = 6,65	Desvio Padrão = 12,05	Desvio Padrão = 11,85
	CV (%) = 11,28	CV (%) = 11,45	CV (%) = 16,97	CV (%) = 16,55
32SA5	Média = 53,4	Média = 60,3	Média = 59,4	Média = 66,0
	Desvio Padrão = 4,25	Desvio Padrão = 5,71	Desvio Padrão = 4,36	Desvio Padrão = 6,23
	CV (%) = 7,96	CV (%) = 9,46	CV (%) = 7,33	CV (%) = 9,44
32SA15	Média = 56,9	Média = 60,8	Média = 64,4	Média = 73,4
	Desvio Padrão = 4,88	Desvio Padrão = 4,33	Desvio Padrão = 7,58	Desvio Padrão = 6,44
	CV (%) = 8,57	CV (%) = 7,13	CV (%) = 11,78	CV (%) = 8,78
37SA0	Média = 52,5	Média = 55,6	Média = 66,5	Média = 70,9
	Desvio Padrão = 2,85	Desvio Padrão = 7,31	Desvio Padrão = 2,90	Desvio Padrão = 7,66
	CV (%) = 5,44	CV (%) = 13,15	CV (%) = 4,36	CV (%) = 10,81
37SA10	Média = 30,2	Média = 53,5	Média = 52,6	Média = 59,15
	Desvio Padrão = 3,69	Desvio Padrão = 2,82	Desvio Padrão = 4,55	Desvio Padrão = 5,62
	CV (%) = 12,22	CV (%) = 5,28	CV (%) = 8,66	CV (%) = 9,50
37SA20	Média = 56,0	Média = 60,2	Média = 65,8	Média = 71,8
	Desvio Padrão = 4,51	Desvio Padrão = 5,59	Desvio Padrão = 8,76	Desvio Padrão = 4,55
	CV (%) = 8,06	CV (%) = 9,28	CV (%) = 13,31	CV (%) = 6,33

É possível observar a influência dos fatores controláveis (relação água/aglomerante, teor de adição e idade de hidratação) na resistência à compressão dos concretos produzidos. Os dados obtidos experimentalmente foram analisados através de regressão múltipla não linear e, dessa forma, a significância de cada parâmetro foi avaliada utilizando a distribuição t, eliminando-se as variáveis que pouco contribuíam para a estimativa da resistência à compressão. Todavia, devido à variabilidade dos dados obtidos, o modelo encontrado para representar o comportamento da resistência à compressão dos concretos com cimentos aluminosos resultou em r^2 não superior a 66,7%, ou seja, nesse caso mais de 30% da variabilidade dos valores previstos não seria representada pelo modelo proposto. Sendo assim, optou-se pela utilização do conceito de Resistência Potencial, onde são adotados os dois maiores valores dos quatro ensaios realizados. Entretanto, foi observado que alguns resultados obtidos para os traços com relação água/aglomerante igual a 0,28 apresentavam uma distorção do comportamento

geral do concreto em comparação com as outras misturas. Tal distorção ocorreu provavelmente devido a falhas no capeamento, excentricidade no ensaio de ruptura, além de troca de pessoal na execução dos ensaios. Portanto, na determinação do modelo matemático todos os traços com tal relação não foram utilizados. O modelo final proposto para o comportamento da resistência à compressão do concreto é apresentado a seguir:

$$f_c = -99,4364 - \frac{5,0001110^{1.1} \cdot ac^3}{(ad^{1.1} + id^{3.2})^6} - \frac{23,0017}{id^{1.1}} + 42,4543ad^{0.05} + \frac{29,095}{(ad^3 + ac^{0.3})^{0.8}} + \frac{108,041}{ac^{0.1}} - \frac{1,0765210^{-3} \cdot ad^3}{(id^2 + ac^{1.2})^{0.18}}$$

Onde:

f_c = resistência à compressão (MPa);

ac = relação água/aglomerante;

ad = teor de adição de sílica ativa (%);

id = idade de hidratação (dias).

O coeficiente de determinação para esse modelo resultou em r^2 igual a 90,65% e, dessa forma, apenas 9,35% da variabilidade dos valores previstos em modelo não é representada pelo mesmo. A Tabela 5. 3 apresenta a Análise de Variância (ANOVA) do modelo de regressão para a resistência à compressão do concreto. As variáveis de controle, ou fatores analisados, ao resultarem em valores de p abaixo de 0,01 indicam que tais fatores são estatisticamente significativos a um nível de confiança superior a 99%. Na Tabela 5. 4, observa-se que todos os fatores apresentam nível de confiança superior a 99,6%

TABELA 5. 3 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE	GDL	SQ	MQ	TESTE F	SIGNIFICÂNCIA - p
MODELO	6	3910,37	651,729	103,39	0,0000
RESÍDUOS	64	403,447	6,30386		
TOTAL CORRIGIDO	70	4313,82			

NOTA: GDL – grau de liberdade; SQ – soma quadrada; MQ – média quadrada

TABELA 5. 4 – PARÂMETROS ESTIMADOS PARA AS VARIÁVEIS DE CONTROLE

FONTE	ESTIMATIVA	ERRO PADRÃO	TESTE t	p
1/ac^{0.1}	108,041	15,6235	6,9153	0,0000
1/id^{1.1}	-23,0017	3,05286	-7,53446	0,0000
ad^{0.05}	42,4543	11,5585	3,67298	0,0005
1/(ad³+ac^{0.3})^{0.8}	29,095	9,53539	3,05126	0,0033
ac³/(ad^{1.1}+id^{3.2})⁶	-5,00011.10 ¹¹	6,37854.10 ¹⁰	-7,83897	0,0000
ad³/(id²+ac^{1.2})^{0.18}	-1,07652.10 ⁻³	2,103.10 ⁻⁴	-5,11895	0,0000
constante	-99,4364	16,0224	-6,20668	0,0000

Nota: ac – relação água/aglomerante; id – grau de hidratação; ad – teor de adição de sílica ativa

Na Tabela 5. 5 estão dispostos os valores obtidos experimentalmente, já na Tabela 5. 6 os previstos pelo modelo ajustado para resistência à compressão do concreto. Nota-se a distorção entre os valores para alguns dos traços com relação água/aglomerante igual a 0,28, evidenciando a variabilidade discutida anteriormente e a decisão em relação à não utilização de tais traços na determinação do modelo matemático.

TABELA 5. 5 – VALORES OBTIDOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

TEOR (%)	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE																			
	0.23				0.25				0.28				0.32				0.37			
	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d
0	55,2	64,9	63,9	69,7					56,8	74,4	65,1	65,3					33,2	57,4	59,3	67,5
	53,7	63,2	68,9	75,8					53,6	62,6	63,0	64,9					32,6	52,9	51,2	57,1
5					64,5	67,3	70,4	73,8					58,0	67,2	64,7	74,5				
					63,2	70,7	70,5	71,8					55,6	62,0	60,0	65,1				
10	63,5	71,2	70,4	80,8					72,4	79,9	78,3	85,0					56,3	63,8	70,0	82,1
	70,5	68,5	62,0	81,1					62,8	77,3	77,1	83,4					52,9	59,3	66,6	69,3
15					64,8	68,2	74,6	81,5					62,9	66,3	72,9	81,1				
					64,1	67,2	66,7	78,5					58,9	61,7	68,2	76,3				
20	58,6	65,9	70,6	71,0					53,8	63,0	76,5	86,8					58,6	66,7	78,1	76,8
	58,1	62,2	69,6	70,4					63,0	62,8	83,9	75,0					58,1	61,8	64,1	72,8

TABELA 5. 6 – VALORES PREVISTOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

TEOR (%)	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE																			
	0.23				0.25				0.28				0.32				0.37			
	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d	3d	7d	28d	63d
0	56,0	64,4	66,5	66,9					48,3	60,1	62,2	62,5					32,5	54,1	56,2	56,6
5					62,3	68,5	70,7	71,0					57,0	65,5	67,6	68,0				
10	65,2	70,2	72,5	73,0					62,3	67,8	70,1	70,5					57,5	64,4	66,7	67,2
15					63,7	68,8	71,6	72,3					60,3	65,8	68,6	69,2				
20	62,3	68,1	71,9	72,9					59,7	65,6	69,4	70,4					56,1	62,3	66,0	67,1

A partir da Análise de Variância (Tabela 5. 3) conclui-se que os todos os fatores analisados influenciam a resistência à compressão do concreto e, da mesma forma, as interações: teor de adição (ad) x relação água aglomerante (ac), relação água/aglomerante (ac) x teor de adição (ad) x idade (id).

5. 3. 1 Efeito dos fatores relação água/aglomerante, teor de adição e idade na resistência à compressão

A interação entre os fatores relação água/aglomerante (ac), teor de adição (ad) e idade (id) na resistência à compressão identificada na análise de variância (Tabela 5. 3) é evidenciada nas Figuras 5. 12 a 5. 16. Em tais figuras, a influência da adição de sílica ativa pode ser notada já nas primeiras idades quando comparadas misturas com adição e misturas sem adição desse material. Verifica-se em geral que quanto maior a relação água/aglomerante, mais eficaz é a utilização de sílica ativa para aumento da resistência à compressão. Além disso, é possível observar que a taxa de crescimento da resistência em função do grau de hidratação é influenciada pela variação da relação água/aglomerante. Para concretos com relação água/aglomerante mais alta o crescimento ocorre de forma mais lenta nas primeiras idades.

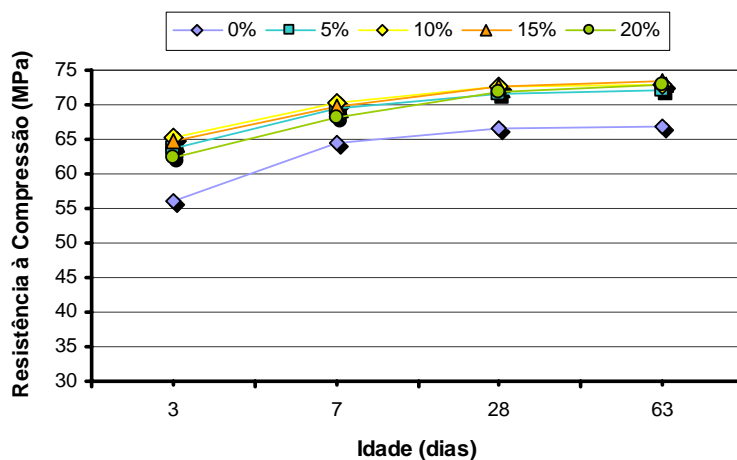


FIGURA 5. 12 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,23

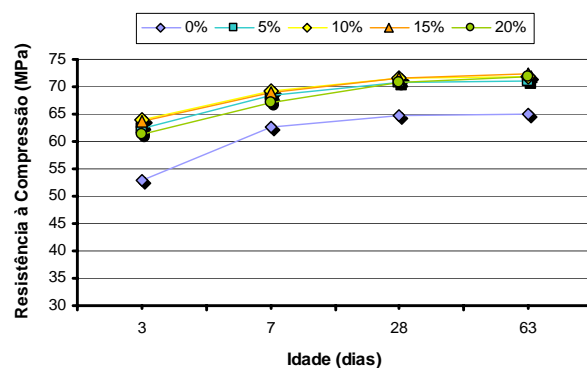


FIGURA 5. 13 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,25

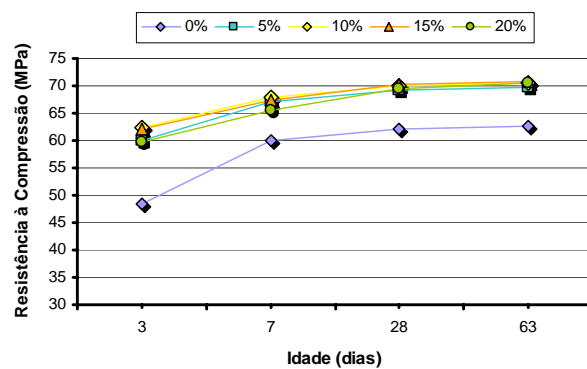


FIGURA 5. 14 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,28

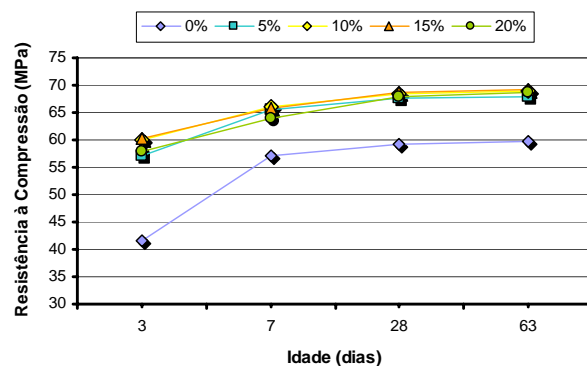


FIGURA 5. 15 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,32

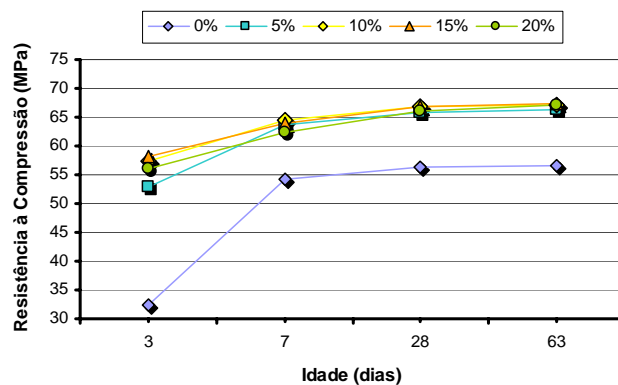


FIGURA 5. 16 – EFEITO DA INTERAÇÃO ENTRE FATORES ANALISADOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO COM A/AGL 0,37

Nas Figuras 5. 17, 5. 18 e 5. 19 são apresentadas as leis de comportamento geral da resistência à compressão dos concretos produzidos, onde estão isolados os efeitos da relação água/aglomerante, teor de adição e idade.

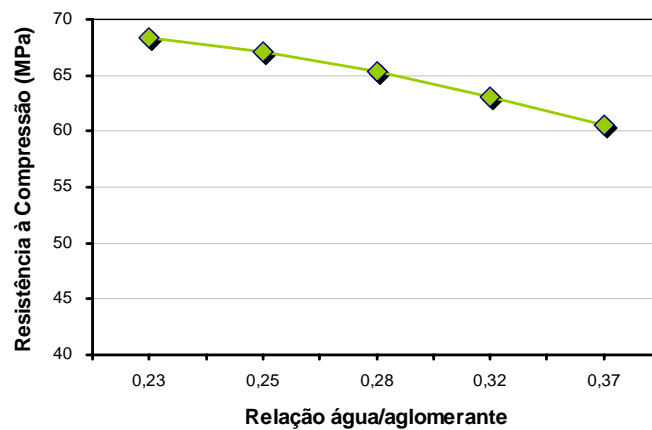


FIGURA 5. 17 – LEI DE COMPORTAMENTO GERAL DO EFEITO ISOLADO DA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

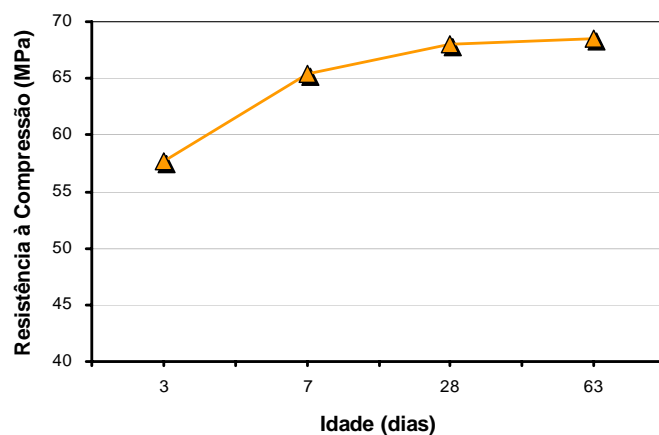


FIGURA 5. 18 – LEI DE COMPORTAMENTO GERAL DO EFEITO ISOLADO DA IDADE SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

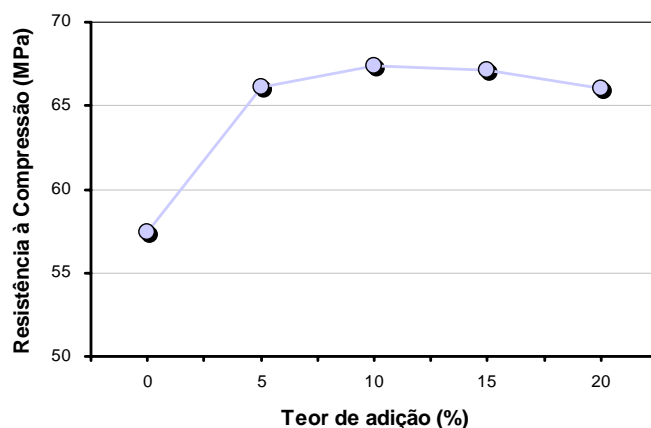


FIGURA 5. 19 – LEI DE COMPORTAMENTO GERAL DO EFEITO ISOLADO DO TEOR DE ADIÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Conforme esperado, observa-se na Figura 5. 17 que, quanto menor a relação água/aglomerante, maior é a resistência à compressão, principalmente em função da redução da porosidade da matriz cimentante e redução da zona de transição entre pasta e agregado. Tais efeitos foram observados por diversos outros pesquisadores (DAL

MOLIN, 1995; KULAKOWSKI, 2002; MENDES, 2002). Já a Figura 5. 18 permite a observação do crescimento da resistência à compressão em função do grau de hidratação.

Foi discutido no item 3. 3 que ao hidratar-se, o cimento aluminoso não produz hidróxido de cálcio e, portanto, o único efeito da adição de sílica ativa em misturas contendo cimentos aluminosos é o efeito físico de refinamento dos poros, ou seja, preenchimento de vazios entre partículas de agregado e produtos de hidratação. Segundo GONÇALVES (2000), a utilização de fíler como adição tem efeito benéfico até cerca de 10% em relação ao peso de cimento. Quando utilizados teores acima desse valor, pode ser observada diminuição da resistência à compressão. Tal tendência de comportamento é notada na Figura 5. 19, onde concretos com teores de sílica ativa iguais a 10% tem resistência superior a concretos com teores inferiores (0 e 5%). Acima desse valor (15 e 20%) ocorre diminuição do desempenho mecânico em relação a misturas com 10% de adição. Além disso, é possível observar na Figura 5. 19 que há um aumento considerável na resistência para concretos com teor igual a 5% de sílica ativa quando comparados aos concretos de referência, sem adição desse material. Conforme mencionado, concretos com teores iguais a 10% apresentam o melhor desempenho mecânico, entretanto, não há uma diferença significativa em relação às misturas com 5% de adição.

5.3.2 Efeito das adições de sílica ativa em função da relação água/aglomerante

A análise de variância (Tabela 5.3) indica que o efeito da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação água/aglomerante é significativo. Tal interação pode ser vista na Figura 5.20. O aumento da resistência à compressão em concretos com 10% de sílica ativa quando comparados aos valores obtidos para concretos sem adição varia entre 10,7% para misturas com relação água/aglomerante igual a 0,23 e 32% para misturas com relação água/aglomerante igual a 0,37. Dessa forma, quanto maior a relação água/aglomerante maior é o efeito da adição de sílica ativa (para teor igual a 10%) na resistência à compressão dos concretos de cimentos aluminosos. Além disso, através dos resultados obtidos observa-se que quanto maior a relação água/aglomerante menor é a perda de resistência quando utilizados teores acima de 10% de adição de sílica ativa. Todavia, tal diferença não é significativa, variando de 2,1% para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,23 a 1,7% para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,37.

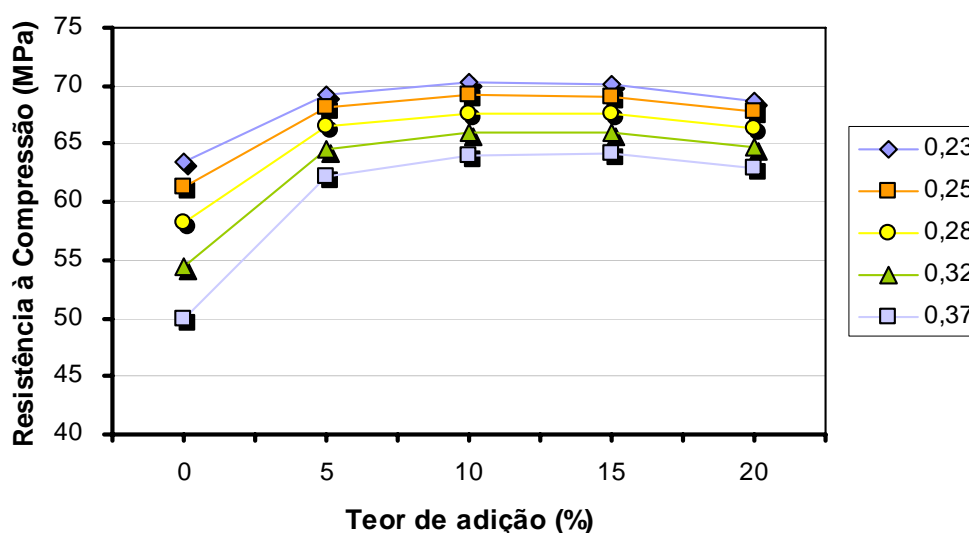


FIGURA 5.20 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE O TEOR DE ADIÇÃO E A RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE.

5. 4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

As Tabelas 5. 7 e 5. 8 a seguir apresentam os valores obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, onde cada calor corresponde à média de quatro corpos de prova provenientes de duas misturas realizadas em dias diferentes, além do desvio padrão e coeficiente de variação. Os valores individuais dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no ANEXO B.

TABELA 5. 7 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

TRAÇO	IDADE			
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	63 DIAS
23SA0	Média = 4,4	Média = 4,2	Média = 4,1	Média = 3,9
	Desvio Padrão = 0,53	Desvio Padrão = 0,61	Desvio Padrão = 0,49	Desvio Padrão = 0,42
	CV (%) = 12,15	CV (%) = 14,73	CV (%) = 12,01	CV (%) = 10,62
23SA10	Média = 4,4	Média = 4,2	Média = 3,9	Média = 3,3
	Desvio Padrão = 0,58	Desvio Padrão = 0,72	Desvio Padrão = 0,37	Desvio Padrão = 0,12
	CV (%) = 13,04	CV (%) = 16,97	CV (%) = 9,33	CV (%) = 3,48
23SA20	Média = 4,6	Média = 3,9	Média = 4,0	Média = 4,7
	Desvio Padrão = 0,69	Desvio Padrão = 0,61	Desvio Padrão = 0,85	Desvio Padrão = 0,04
	CV (%) = 15,09	CV (%) = 15,49	CV (%) = 20,96	CV (%) = 0,83
25SA5	Média = 0,6	Média = 4,4	Média = 4,1	Média = 3,8
	Desvio Padrão = 0,04	Desvio Padrão = 0,67	Desvio Padrão = 0,70	Desvio Padrão = 0,67
	CV (%) = 15,09	CV (%) = 15,28	CV (%) = 17,26	CV (%) = 17,77
25SA15	Média = 3,1	Média = 4,6	Média = 3,7	Média = 4,7
	Desvio Padrão = 1,35	Desvio Padrão = 0,13	Desvio Padrão = 0,92	Desvio Padrão = 0,13
	CV (%) = 43,93	CV (%) = 2,82	CV (%) = 24,97	CV (%) = 2,78
28SA0	Média = 4,1	Média = 3,5	Média = 3,6	Média = 4,2
	Desvio Padrão = 0,20	Desvio Padrão = 0,51	Desvio Padrão = 0,37	Desvio Padrão = 0,43
	CV (%) = 4,74	CV (%) = 14,43	CV (%) = 10,46	CV (%) = 10,12
28SA10	Média = 2,4	Média = 4,3	Média = 3,7	Média = 4,1
	Desvio Padrão = 0,43	Desvio Padrão = 0,82	Desvio Padrão = 0,49	Desvio Padrão = 0,32
	CV (%) = 17,78	CV (%) = 19,14	CV (%) = 13,21	CV (%) = 7,70

TABELA 5. 8 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

TRAÇO	IDADE			
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	63 DIAS
28SA20	Média = 4,9	Média = 4,4	Média = 4,1	Média = 4,3
	Desvio Padrão = 0,17	Desvio Padrão = 0,78	Desvio Padrão = 0,38	Desvio Padrão = 0,13
	CV (%) = 3,51	CV (%) = 17,94	CV (%) = 9,28	CV (%) = 3,08
32SA5	Média = 3,1	Média = 3,3	Média = 3,5	Média = 4,3
	Desvio Padrão = 0,27	Desvio Padrão = 0,94	Desvio Padrão = 0,26	Desvio Padrão = 0,17
	CV (%) = 9,01	CV (%) = 22,61	CV (%) = 7,45	CV (%) = 3,99
32SA15	Média = 1,4	Média = 3,7	Média = 4,0	Média = 3,9
	Desvio Padrão = 0,19	Desvio Padrão = 0,81	Desvio Padrão = 0,64	Desvio Padrão = 0,59
	CV (%) = 13,14	CV (%) = 21,54	CV (%) = 16,27	CV (%) = 15,02
37SA0	Média = 4,1	Média = 3,7	Média = 4,3	Média = 3,8
	Desvio Padrão = 0,55	Desvio Padrão = 0,72	Desvio Padrão = 0,31	Desvio Padrão = 0,52
	CV (%) = 13,51	CV (%) = 19,74	CV (%) = 7,23	CV (%) = 13,73
37SA10	Média = 3,1	Média = 3,5	Média = 4,4	Média = 4,2
	Desvio Padrão = 0,16	Desvio Padrão = 0,51	Desvio Padrão = 0,56	Desvio Padrão = 0,62
	CV (%) = 5,18	CV (%) = 14,69	CV (%) = 12,78	CV (%) = 14,75
37SA20	Média = 4,2	Média = 4,4	Média = 4,5	Média = 4,3
	Desvio Padrão = 0,56	Desvio Padrão = 0,68	Desvio Padrão = 0,35	Desvio Padrão = 0,08
	CV (%) = 13,28	CV (%) = 15,40	CV (%) = 7,61	CV (%) = 1,77

Ao serem analisados os valores obtidos experimentalmente observa-se que as diversas misturas têm seu comportamento regido por características próprias, não sendo clara a lei que determina o desempenho desses materiais quando solicitados à esforços de tração. Através da análise de regressão múltipla não linear não foi possível estabelecer um modelo que representasse o comportamento da resistência à tração por compressão diametral com r^2 superior a 60 %. Dessa forma, aproximadamente 40% da variabilidade dos valores previstos não seria representada pelo modelo proposto. Provavelmente problemas na execução do ensaio devido às características do equipamento causaram tal dispersão nos resultados. O equipamento utilizado foi adaptado para execução dos ensaios de tração por compressão diametral. Nesse equipamento há uma placa ligada a uma rótula como é possível observar na Figura 5. 21. A placa não é fixa podendo girar com o movimento da rótula. Dessa forma, qualquer problema de excentricidade do corpo de

prova em relação ao eixo da placa não permite que os esforços sejam aplicados corretamente e, por conseguinte, os resultados obtidos não representam as características mecânicas do material. Como consequência de tal dispersão verificada nos resultados obtidos para esse ensaio não foi possível definir uma lei de comportamento geral da resistência à tração por compressão diametral para concretos de cimentos aluminosos. Todavia, embora não possam ser analisados estatisticamente, os valores obtidos estão compatíveis com os resultados apresentados em diversos estudos que analisaram tal propriedade em concretos de alta resistência (DAL MOLIN, 1995; MENDES, 2002).



FIGURA 5. 21 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

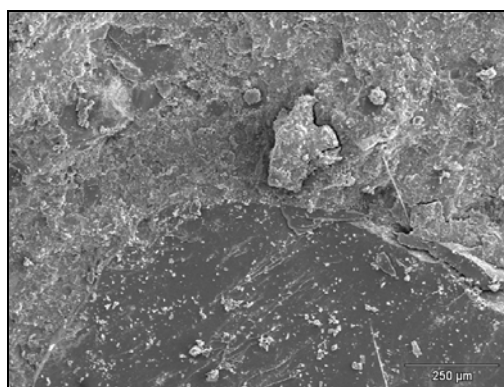
5.5 Análise da Microestrutura do Concreto

Diversos autores (PAULON, 1991; MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 1995; LAMOUR et al., 2001) concluíram que as propriedades do concreto no estado endurecido são influenciadas pelo proporcionamento dos materiais, assim como por suas características microestruturais, como tipo, quantidade e distribuição de sólidos e vazios.

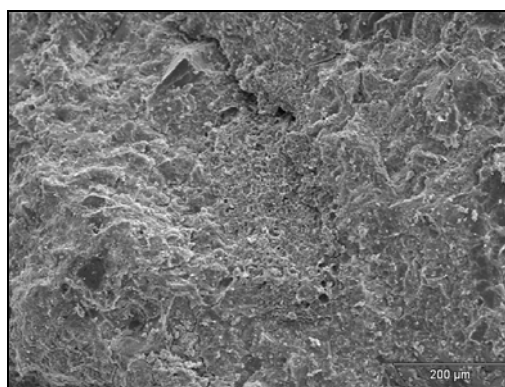
Sendo assim, com o objetivo de entender melhor o comportamento de concretos contendo cimentos aluminosos a sua estrutura interna foi analisada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários. Tal técnica de análise permite a observação da estrutura interna do concreto, fornecendo informações significativas relacionadas à distribuição mineralógica, presença de vazios, fissuras ou produtos de reação. Todavia, deve ser ressaltado que não sendo objetivo desse estudo a análise microestrutural, apenas uma abordagem simplificada com efeito ilustrativo será descrita no presente item.

Nas Figura 5. 22 a 5. 38 são apresentadas algumas micrografias obtidas para concretos com 28 dias de hidratação. É possível observar a matriz da pasta, a zona de transição entre pasta e agregado, alguns poros presentes, além da sílica ativa e alguns produtos de reação. O ANEXO D contém as principais micrografias, além de análise utilizando espectrômetro de energia dispersiva (EDS) para os concretos analisados.

A partir das micrografias obtidas, nota-se que tanto a matriz da pasta de cimento como a zona de transição para os diversos traços analisados apresentam baixa porosidade e não há presença significativa de fissuras. A estrutura parece densa e homogênea, entretanto, com o aumento da relação água/aglomerante, há um ligeiro aumento na fissuração e porosidade. Tal aumento não é tão significativo, pois, conforme os resultados obtidos para as propriedades mecânicas analisadas, não há aumento tão pronunciado na resistência ao variar-se a relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa nas misturas.



(a)



(b)

FIGURA 5. 22 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,23 SEM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 100x (b) AUMENTO DE 150x

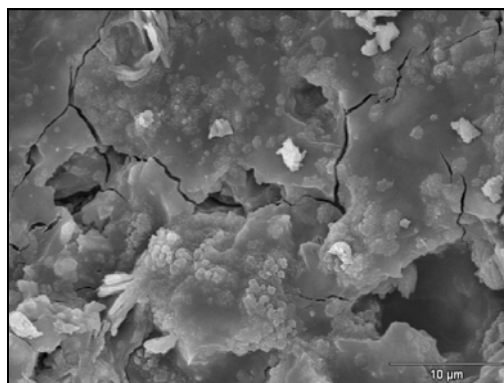
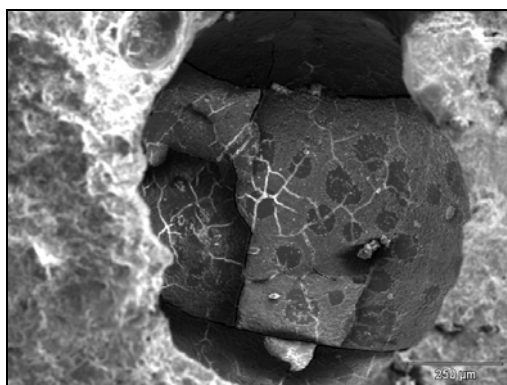
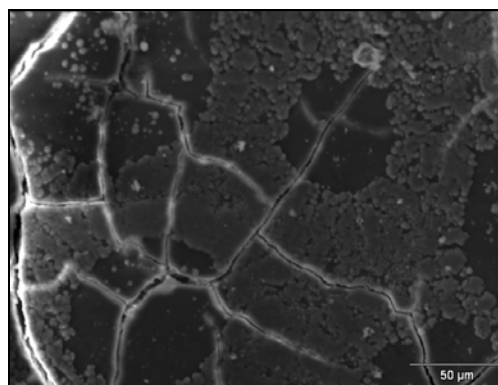


FIGURA 5. 23 – MICROGRAFIA DE CONCRETO (PORO) COM RELAÇÃO A/AGL 0,23 SEM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – AUMENTO DE 3000x

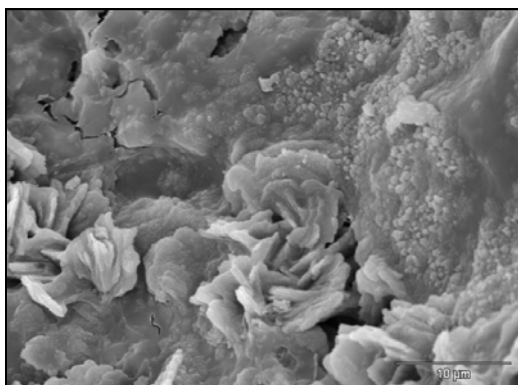


(a)

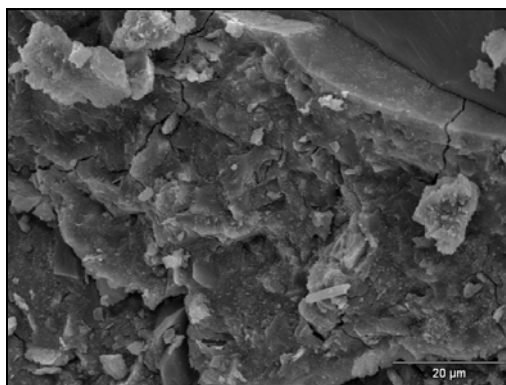


(b)

FIGURA 5. 24 – MICROGRAFIA DE CONCRETO (PORO) COM RELAÇÃO A/AGL 0,28 e 10% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 100x (b) AUMENTO DE 500x

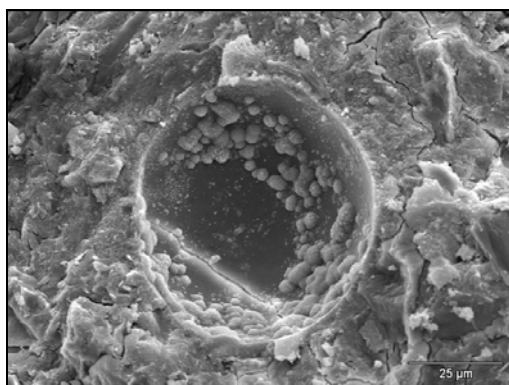


(a)

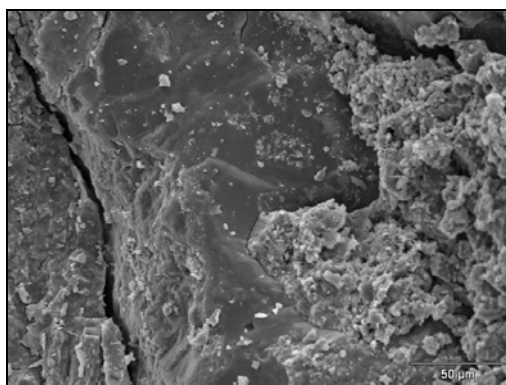


(b)

FIGURA 5. 25 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,28 e 10% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 3000x (b) AUMENTO DE 1500x

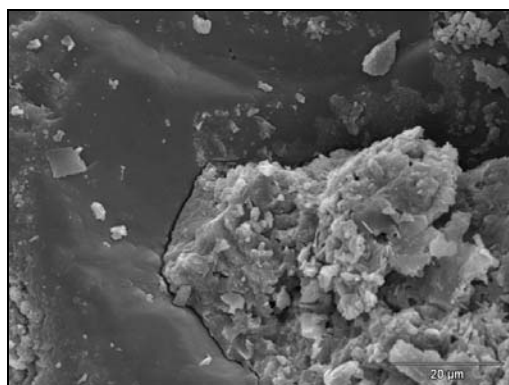


(a)

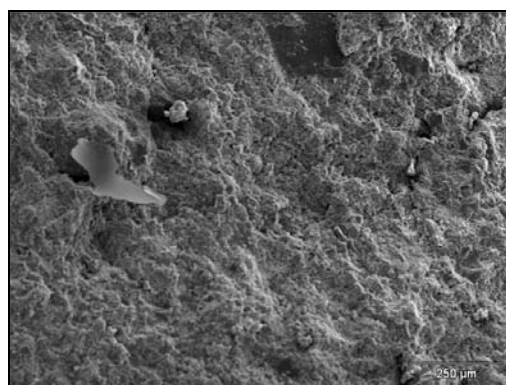


(b)

FIGURA 5. 26– MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,28 E 10% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 1000x (b) AUMENTO DE 500x

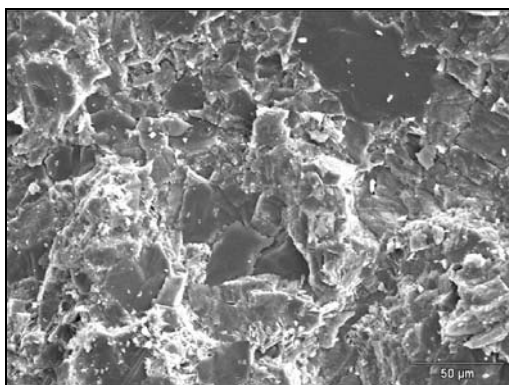


(a)

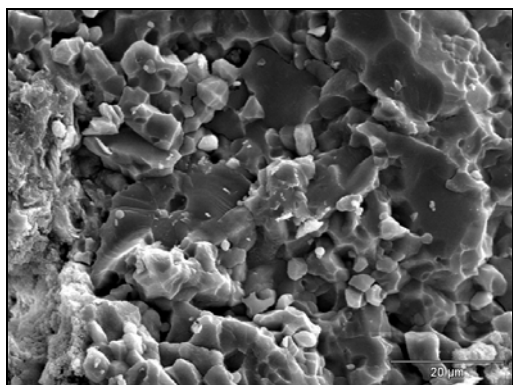


(b)

FIGURA 5. 27 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,28 E 10% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 1500x (b) AUMENTO DE 100x

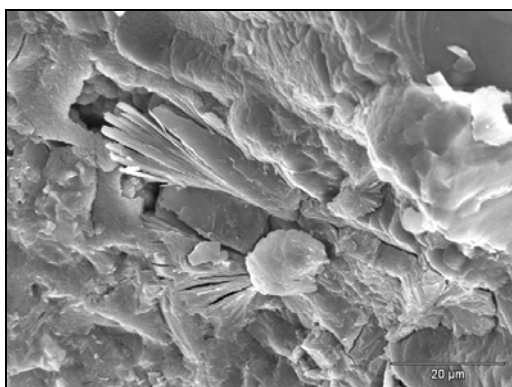


(a)

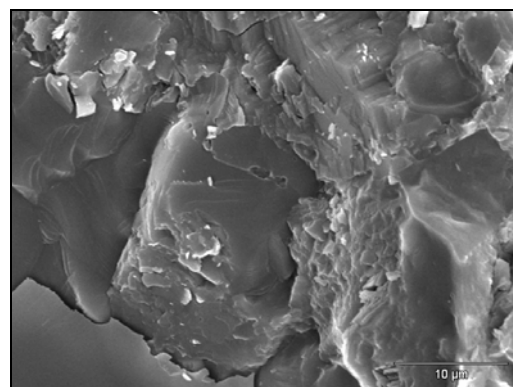


(b)

FIGURA 5. 28 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,32 E 15% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 500x (b) AUMENTO DE 1500x



(a)



(b)

FIGURA 5. 29 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,37 E 20% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 1500x (b) AUMENTO DE 3000x

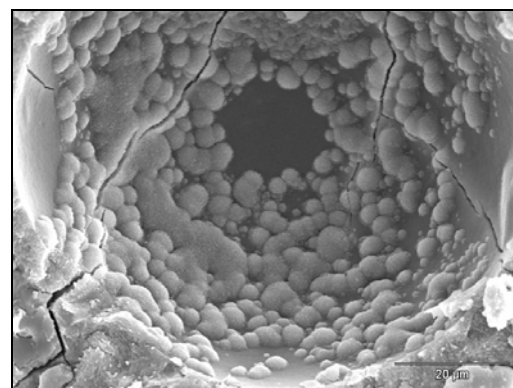
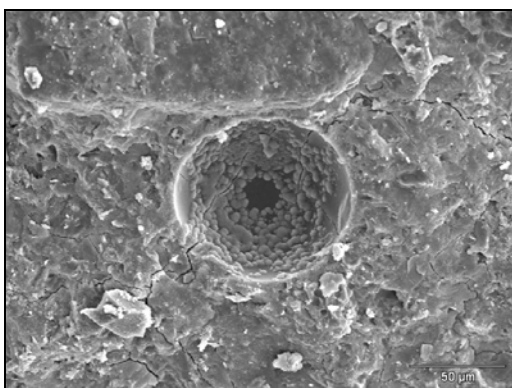


FIGURA 5. 30 – MICROGRAFIA DE CONCRETO COM RELAÇÃO A/AGL 0,37 E 20% DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA – (a) AUMENTO DE 500x (b) AUMENTO DE 1500x

Em concretos de cimento Portland a adição de sílica ativa proporciona uma melhoria significativa em sua microestrutura e desempenho mecânico devido às reações pozolânicas entre a sílica e os cristais de hidróxido de cálcio formados durante o processo de hidratação do cimento. Como já foi comentado, a adição de sílica ativa em misturas contendo cimentos aluminosos é interessante para o preenchimento de vazios e poros capilares, ou ainda os espaços entre agregados e produtos de hidratação, densificando a matriz e zona de transição e, portanto, reduzindo dessa forma a porosidade e permeabilidade do sistema.

Ao analisar-se os concretos produzidos não foi observada presença de cristais de hidróxido de cálcio, como esperado. Portanto, embora a resistência mecânica do concreto tenha sido modificada com a adição de sílica ativa, não foi observada diferença significativa na estrutura da matriz.

6 CONCLUSÃO

6.1 Considerações Iniciais

O objetivo principal desse estudo foi caracterizar o cimento aluminoso quanto a algumas propriedades básicas como resistência à compressão e resistência à tração (resistência à tração por compressão diametral) e, dessa forma, analisar a possibilidade da aplicação desse material em concretos de alta resistência para elementos estruturais. Através dos ensaios realizados foi possível verificar a influência da relação água/aglomerante, teor de adição de sílica ativa e grau de hidratação na resistência em concretos contendo cimentos aluminosos.

Além da análise das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de análise da compatibilidade entre o cimento aluminoso, a sílica ativa e alguns aditivos superplastificantes usualmente aplicados na produção de concretos de alta resistência com cimento Portland.

Conforme já discutido, no Brasil não há um número satisfatório de material publicado ou literatura técnica especializada que discuta a compatibilidade entre os cimentos aluminosos e aditivos superplastificantes, ou mesmo o comportamento do cimento aluminoso em concreto estrutural. Portanto, tendo como base o comportamento mecânico dos concretos produzidos, outro objetivo desse estudo foi estabelecer um modelo de estimativa das propriedades mecânicas desses materiais, além de fornecer parâmetros que contribuam para a utilização adequada e segura de concretos de cimentos aluminosos .

A seguir serão apresentadas algumas conclusões obtidas de acordo com o programa experimental desenvolvido, e são referentes aos concretos produzidos com qualidades específicas de materiais dentro das faixas de valores estabelecidos para a quantidade e consumo de tais materiais, além das técnicas de execução. Para transpor os

índices encontrados nas análises obtidas, ou mesmo confirmar e complementar os resultados obtidos, é necessário a execução de novos estudos.

6. 1. 1 Com relação à Compatibilidade entre cimento, aditivos e sílica ativa

- A análise dos aditivos superplastificantes através do ensaio de miniabatimento concluiu que os aditivos D e E (polinaftalenos sulfonados) são incompatíveis com o cimento aluminoso ou apresentam menor eficiência em relação aos outros tipos estudados (policarboxilatos), dentro da faixa de teores analisados. Já os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos analisados A, B e C são compatíveis com os cimentos aluminosos pois proporcionaram espalhamento da pasta e perda reduzida de abatimento em função do tempo. Através de tal análise foi possível observar que os aditivos A, B apresentaram desempenho superior em relação ao aditivo C ao proporcionar uma área maior de espalhamento da pasta em função do tempo de hidratação.
- Com base nos resultados obtidos nos ensaios de Marsh para as duas relações água/cimento utilizadas (0,25 e 0,35), dois teores de adição (0 e 10%) e diversos teores de aditivo, observou-se que o aditivo A apresentou melhor desempenho em relação ao aditivo B, quando comparado o tempo de escoamento em função do teor de material, sendo escolhido para a produção das misturas de concreto.
- Através da análise de fluidez utilizando o método do funil de Marsh foi possível determinar o ponto de saturação do aditivo, característica fundamental na determinação do traço através do método de dosagem proposto por AİTCIN (2000). Foram obtidos dois pontos de saturação para o aditivo superplastificante do tipo A, um para relação água/aglomerante igual a 0,35 (0,20% em teor de sólidos totais) e o outro para relação água/aglomerante 0,25 (0,25% em teor de sólidos totais), ambos com 10% de adição de sílica ativa.

6. 1. 2 Com relação à Resistência à Compressão

- A relação água/aglomerante e o grau de hidratação foram as variáveis de controle que mais influenciaram a resistência à compressão do concreto contendo cimentos aluminosos.
- O comportamento da resistência à compressão do concreto em relação aos fatores analisados (relação água/aglomerante, teor de adição e idade de hidratação) é significativo para a resistência à compressão.
- A taxa de crescimento da resistência é função da relação água/aglomerante, ou seja, quanto menor a relação água/aglomerante, maior é a resistência à compressão. Além disso, é possível observar que a taxa de crescimento da resistência em função do grau de hidratação é influenciada pela variação da relação água/aglomerante. Para concretos com relação água/aglomerante mais alta o crescimento ocorre de forma mais lenta nas primeiras idades.
- A utilização de sílica ativa não apresenta efeitos tão pronunciados como em concretos de cimento Portland, porém é possível observar que ao aumentar-se a relação água/aglomerante, mais eficaz é a utilização da sílica ativa para aumento da resistência à compressão. Entretanto, poderiam ser utilizados outros finos com menor custo na produção de concretos contendo cimentos aluminosos.
- Em relação ao teor de adição, nota-se um ligeiro aumento até cerca de 10%. Acima desse valor a resistência tende a diminuir. Tal fato está em consonância com a bibliografia pois, devido às características das reações de hidratação do cimento aluminoso, a adição tem apenas o efeito físico (fíler) de preenchimento de poros e vazios capilares.
- O efeito da adição de sílica ativa na resistência quanto utilizado um teor igual a 10% é proporcional ao aumento da relação água/aglomerante. Da mesma forma, quando teores iguais a 20% são utilizados, a perda de resistência é menor ao aumentar-se a relação água/aglomerante.

- A análise estatística dos dados obtidos para os ensaios de resistência à compressão foi realizada através de regressão múltipla não linear resultando em um modelo matemático de previsão da resistência com r^2 acima de 90%. O modelo obtido foi:

$$f_c = -99,4364 - \frac{5,0001110^{11} \cdot ac^3}{(ad^{1.1} + id^{3.2})^6} - \frac{23,0017}{id^{1.1}} + 42,4543ad^{0.05} + \frac{29,095}{(ad^3 + ac^{0.3})^{0.8}} + \frac{108,041}{ac^{0.1}} - \frac{1,0765210^{-3} \cdot ad^3}{(id^2 + ac^{1.2})^{0.18}}$$

Onde:

f_c = resistência à compressão (MPa);

ac = relação água/aglomerante;

ad = teor de adição de sílica ativa (%);

id = idade de hidratação (dias).

6. 1. 3 Com relação à Resistência à Tração por Compressão Diametral

- Através dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão diametral observa-se que essa propriedade é influenciada pela relação água/aglomerante, teor de adição e grau de hidratação do concreto. Entretanto, devido às variabilidades já discutidas no item 5. 4 não foi possível estabelecer um modelo que definisse de maneira clara e eficiente o comportamento do concreto em função da alteração das variáveis de controle analisadas.

6. 2 Sugestões para futuros trabalhos

A falta de estudos publicados sobre a utilização de concretos contendo cimentos aluminosos no Brasil possibilita o desenvolvimento de inúmeros trabalhos relacionados à comparação de desempenho e custo entre esse material e concretos contendo cimento Portland. Algumas sugestões para pesquisa e futuros trabalhos serão apresentados a seguir:

- Determinação de métodos específicos de dosagem para concretos com cimentos aluminosos;
- Estudos relacionados a outras propriedades mecânicas de concretos com cimentos aluminosos como: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistência à tração, determinação da relação entre resistência à tração e resistência à compressão, além de análise de tais propriedades mecânicas nas primeiras horas de hidratação de concretos contendo cimentos aluminosos.
- Investigações de resistividade elétrica em concretos produzidos com cimentos aluminosos, além de outros estudos relacionados à durabilidade como: permeabilidade aos íons cloreto, porosidade, carbonatação;
- Análise do processo de conversão dos cimentos aluminosos, e influência desse processo na resistência do concreto a idades mais avançadas e diferentes condições de cura;
- Análise microestrutural de concretos e argamassas produzidos com cimentos aluminosos, além de estudos sobre a evolução das reações de hidratação da pasta de cimento com e sem adições de sílica ativa por meio de difração de raios-X.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **Definition of Terms Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. ASTM C 125. Philadelphia, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **Definition of Terms Relating to Hydraulic Cement**. ASTM C 219. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregados – Agregado em estado solto - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810**: Agregados – Agregado em estado compactado seco - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado Graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado Miúdo - Determinação da absorção da água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Agregados - Determinação do teor de material pulverulento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregados - Determinação do índice de forma pelo método de paquímetro. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13847**: Cimento aluminoso para uso em material refratário. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7682**: Cimento – Calda de cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Cimento Portland Pozolânico – Determinação da Pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cimento portland Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto - Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de Resistência. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994

AİTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Trad. Geraldo G. Serra. São Paulo, Ed. Pini, 2000, p. 667.

AİTCIN, P. C.; MEHTA, P. K. Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 2, p. 103-107, Mar/Apr. 1990.

AİTCIN, P. C.; NEVILLE, A. M. High-Performance Concrete Demystified. **Concrete International**, v.15, n.1, p. 21-26, January, 1993.

AİTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C; MACGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v. 16, n. 5, p. 45-52, May, 1994.

ALAEJOS GUTIERREZ, P.; CANOVAS, M. F. Composición y dosificación de hormigones de alta resistencia. **Cemento y Hormigón**, n. 709, p. 971-990, Ago, 1992.

ALEXANDER, M. G.; FOURIE, C. W. Acid Resistance of Calcium Aluminate Cement in Concrete Sewer Pipe Mixtures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 633-645.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência**. Porto Alegre, 2000. 137p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AMATHIEU L.; BIER, Th. A.; SCRIVENER. K. L. Mechanisms of Set Acceleration of Portland Cement Through CAC Addition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 303-317.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 212. Chemical admixtures for concrete. ACI 212.3R-91 (Reapproved 1997). **ACI Manual of Concrete Practice 2001**, ACI, Detroit (USA), 2001. 31p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. State-of-the-art Report on High-Strength Concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, ACI, Detroit (USA). Part1, 1991. 48p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363R-92 (Reapproved 1997). State-of-the-art Report on High-Strength Concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, ACI, Detroit (USA). Part1, 1998. 48p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363 (Reapproved 1997). State-of-the-art Report on High-Strength Concrete. **ACI Manual of Concrete Practice 2001**, ACI, Detroit (USA), 2001. 55p.

ANDIÓN, L. G.; GARCÉS, P.; ALCOCEL, E. G.; GALAO, O.; CASES, F. Forced Rebar Corrosion for Durability Problems in Calcium Aluminate Cement Structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 395-404.

ANDRADE, C.; SAGRERA, J. L.; HIDALGO, A.; ALONSO, C. Effect of Humidity in the Natural Carbonation of CAC. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 361-369.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. Porto Alegre, 1998. 153p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BAALBAKI, W; BENMOKRANE, B.; CHAALLAL, O.; AİTCIN, P. C. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 5, p. 449-503, Sep/Oct. 1991.

BACHE, H. H. Densified Cement/Ultrafine Particle-Based Materials. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZER IN CONCRETE, June, 1981, Ottawa. **Proceedings**. p.1-35.

BALBO, J. T. Applications of High-Performance Concrete for Ultra-Thin Pavements Overlays (White-Topping). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2, 1992, Gramado, **Proceedings**. Michigan: CANMET/ACI, 1999, p. 731-743.

BLICK, R. L.; PETERSEN, C. F.; WINTER, M. E. Proportioning and Controlling High-Strength Concrete, **ACI SP-46**, p. 141-163. 1974.

BOCH P.; MASSE, S.; LEQUEX, N. CAC in Refractory Applications: from LCCs to ZCCs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 449-466.

BOULAY, C. Capping HPC Cylinders with the Sand Box. New Developments, In: 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH/HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, v. 2. May, 1996, Paris. **Proceedings**. v. 2, p.197-202.

BOULAY, C.; DE LARRARD, F. A new capping system for testing cylinders: the Sand Box. **Concrete International**, v. 15, n. 4, p. 63-66, April, 1993.

BUCHER, H. R. E. Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 1988, v. 2, p. 609-625.

CARRASQUILLO, P. M; CARRASQUILLO, R. L. Evaluation of the use of current concrete practice in the production of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, v. 85, n. 1, p. 49-54, Jan/Feb. 1988.

CARRASQUILLO, P. M.; NILSON, A. H; SLATE, F. O. Properties of high-strength concrete subject to short-term loads. **ACI Materials Journal**, v. 78, n. 3, p. 171-181, May/June. 1981.

CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Superplasticizing admixtures in concrete**. London, 1978. (Publication, 45030).

CERVO, A L. **Metodologia Científica**. 5ª edição, São Paulo, Ed. Prentice Hall, 2002.

CHATERJEE, A. K. An Update on the Binary Calcium Aluminates Appearing in Aluminous Cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 37-64.

CHORINSKY, E. Gf. Repair Systems for High Strength Concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, 2, 1990, Berkeley (CA). **Proceedings**. California: CANMET/ACI, 1990.

COLLEPARDI, M. Superplasticizers and air entraining agents: state of the art and future needs. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. **Papers**. Detroit: American Concrete Institute, 1994. p399-416.(ACI Special Publication, 144).

COLLEPARDI, S; et al. Mechanisms of Actions of Different Superplasticizers for High-Performance Concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2., 1999, Gramado. **Proceedings**. Michigan: CANMET/ACI, 1999. p. 503-523.

COLLEPARDI, S.; MONOSI, S.; FAVONI, O.; COLLEPARDI, M. Fiber-Reinforced, High-Performance Mortars with High-Alumina Cement and Silica Fume. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 649-657.

COX, J. D.; SHARP, J. H. The Early Hydration of a Refractory Calcium Aluminate Cement in the Presence of Sodium Carbonate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 249-266.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990**. Lausanne, CEB, 1991. 159p. (Bulletin d'information, 203).

DAL MOLIN, D. C. C.; WOLF, J. Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alta resistência em edifícios altos. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 10, Gramado, 1990. **Anais**. Porto Alegre, SERGS, 1990, p. 853-863.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssilica**. São Paulo, 1995, 286p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DE LARRARD, F.; et al. High Strength Concrete for a Nuclear Power Plant. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, 2, 1990, Berkeley, (CA), **Proceedings**. California: CANMET/ACI, 1990.

DE LARRARD, F.; BELLOC, A. Are small aggregate really better for making high-strength concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 12, n. 2, p. 47-52. 1990.

DE LARRARD, F.; MALIER, Y. Engineering properties of very high performance concrete. In: MALIER, Y. (editor), High-performance concrete – from materials to structure. London, E & FN Spon, 1992, p. 85-114.

DING, J.; FU, Y.; BEAUDOIN, J. J. Temperature Dependence of Compressive Strength of Conversion-Inhibited High Alumina Cement Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 6, , p. 540-545. Nov/Dec. 1997.

DUNSTER, A. ; HOLTON, I. A Laboratory Study of the Resistance of CAC Concretes to Chemical Attack by Sulphate and Alkali Carbonate Solutions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 333-348.
FACHIN, O. **Fundamentos de Metodologia**. 4ª edição, São Paulo: Saraiva, 2003

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINTÉ/ COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **High strength concrete-state of the art report**. London: Chameleon Press, 1990. 61p. (SR 90/1 – Bulletin d'Information, 197).

FREEDMAN, S. **High-Strength Concrete**. ISI 76-OIT, Portland Cement Association, Skokie, IL, 1971, 19 p.

FRYDA, H.; SCRIVENER, K. L.; CHANVILLARD, G.; FÉRON, C. Relevance of Laboratory Tests to Field Applications of Calcium Aluminate Cement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 227-246.

GARZÓN, L. Torres Petronas. Projeto e Execução das Torres Gêmeas mais altas do mundo. In: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CONCRETOS ESPECIAIS, Setembro, 2004, SOBRAL (CE).

GAZTAÑAGA, M. T.; GOÑI, S.; GUERRERO, A. Accelerated Carbonation of Calcium Aluminate Cement Paste. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 349-359.

GIACCIO, G.; ROCCO, C.; VIOLINI, D. ; ZAPPITELLI, J. ; ZERBINO, R. High-Strength concretes incorporating different coarse aggregates. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 3, p. 242-246, May/June, 1992.

GIAMUSSO, S. E. Os aditivos na tecnologia do concreto. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30, 1988, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: IBRACON, 1988, v. 2, p. 651-663.

GJORV, O. E. High Strength Concrete In: Malhotra, V. M. (ed) **Advances in Concrete Technology**. Ottawa: CANMET, 1994. p. 19-82.

GJORV, O. E. High-Strength Concrete. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, Athens, 1992. **Proceedings**. Montreal: CANMET, 1992. p21-27

GLASSER, F. P. Progress in the immobilization of radioactive wastes in cement. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 2, p. 201-216. 1992.

GONÇALVES, J. R. A.; ALMEIDA, I. R.; SHEHATA, L. C. D. Influência do tipo de agregado graúdo nas propriedades do concreto de alta resistência – In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 36, 1994, Porto Alegre. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 1994, v. 1, p. 339-352.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Porto Alegre, 2000. 120p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOODE, W. J.; HATT, P.K. **Métodos em pesquisa social**. São Paulo: Nacional, 1981

GOYNS, A. Calcium Aluminate Cement Linings for Cost-Effective Sewers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 617-631.

GU, P.; BEAUDOIN, J. J.; QUINN, E. G.; MYERS, R.E.; Early strength development and hydration of ordinary portland cement/calcium aluminate cement pastes. **Advanced Cement Based Materials**, v. 6, n. 2, p. 53-58, Aug. 1997.

HELENE, P.; HARTMANN, C. HPCC in Brazilian Office Tower. **Concrete International**, v. 25, n. 12, December. 2003.

HEWLETT, P. C.; RIXOM, R. Superplasticized Concrete. **ACI Journal**, v. 74, p. 6-11, May. 1977.

HOLTERHOFF JR., A. G. Fire Training Facilities: Materials and Methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 577-583.

HOWARD, N. L.; LEATHAM, D. M. The production and delivery of high-strength concrete. **Concrete International**, v. 11, n.4, p. 26-30, April. 1989.

HUYNTH, H. T. La compatibilité ciment-seuperplastifiant dans les bétons à hautes performances-synthèse bibliographique. **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, Nov/Dec, 1996, n. 206. p. 63-73.

ILLSTON, J. M.; DINWOODIE, J. M.; SMITH, A. A. (1987). **Concrete, Timber and Metals: The Nature and Behavior of Structural Materials**, Van Nostrand Reinhold, New York, ISBN 0-442-30415-6, 663 p.

JENNINGS, H. M. Design of high strength based materials. Part 2 – microestrutura. **Materials Science and Technology**, v. 4, n. 4, p 285-290, April 1988.

JOHNSON, C. D.; MIRZA, S. A. Confined capping system for compressive strength testing of high-performance concrete cylinders. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 3, p. 617-620, June. 1990.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KULAKOWSKI, M. V. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Porto Alegre, 2002. 180p. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LARBI, J. A.; BIJEN; J. M. Effect of mineral admixtures on the cement paste aggregate interface. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY-ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. 4, Istanbul, Turkey, 1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1992, v. 1, p. 655-669 (ACI Special Publications, 132).

LAMOUR, V. H. R.; MONTEIRO, P. J. M.; SCRIVENER, K. L.; FRYDA, H. Microscopic Studies of the Early Hydration of Calcium Aluminate Cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 169-180.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 60 MPa**. Brasília, 1999. 170p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília.

MAILVAGANAM, N. P. Admixture Compatibility in Special Concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2., 1999, Gramado. **Proceedings**. Michigan: CANMET/ACI, 1999. p. 615-634.

MAILVAGANAM, N, P. Factors influencing slump loss in flowing concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 1, 1978, Ottawa, Canada. **Papers**. Detroit: American Concrete Institute, 1979. p. 389-403. (ACI Special Publication, 62).

MALHOTRA, V. M. High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete. **Concrete International**, v. 24, n. 7, July. 2002.

MALHOTRA, V. M. Superplasticizers: a global review with emphasis on durability and innovative concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, 3, 1989, Ottawa, Canada. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1989. p. 1-17. (ACI Special Publication, 119).

MALHOTRA, V. M. **Mechanical properties and freezing and thawing resistance of non air-entrained and air-entrained condensed silica fume concretes using ASTM test C666 procedures A and B.** Montreal: CANMET, 1984. (CANMET Report, MRP/MSL 84-153).

MALHOTRA, V. M.; MALANKA, D. Performance of superplasticizers in concrete: laboratory investigation – Part I. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 1., 1978, Ottawa, Canada. **Papers.** Detroit: American Concrete Institute, 1979. p. 209-243. (ACI Special Publication, 62).

MEHTA, P. K.; AİTCIN, P. C. Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strength Concrete. In: HSC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION ON HIGH STRENGTH CONCRETE, 2nd, ACI SP121. **Proceedings.** 1990a, p. 265-286.

MEHTA, P. K.; AİTCIN, P. C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cemente, Concrete and Aggregates**, Philadelphia, v. 12, n. 2, p. 70-78, winter, 1990b.

MEHTA, P. K. Advancements in Concrete Technology. **Concrete International**, v. 6, n. 21, p. 69-76, June 1999.

MENDES, S. E. da S. M., **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** Curitiba, 2002. 146p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

MIRZA, S. A.; JOHNSON, C. D. Compressive Strength Testing of HPC cylinders using confined caps. **Construction Building Materials**, v. 10, n. 8, p. 589-595, 1996.

MOHAMED, B. M.; SHARP, J. H. Kinetics of Formation of $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (Dodecacalcium Heptaaluminate). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings.** p. 65-76.

MONTEIRO, P. J. M. **Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces, aspectos de durabilidade e de microfissuração.** São Paulo, 1993. 148p. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MONTEIRO, P. J. M. **Microstructure of concret and its influence on the mechanical properties.** Berkeley, California, 1985. 153p. Tese de Doutorado. University of California, Berkeley.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** New York: John Wiley and Sons, 1986.

MOORE, J. A. High-Performance Concrete for Bridge Decks. **Concrete International**, v. 21, n.2, February, 1999.

MORENO, J. High-Performance concrete: economic considerations. **Concrete International**, v. 20, n. 3, p. 68-70, March, 1998.

NAWA, T.; EGUCHI, H.; OKKUBO, M. Effect of fineness of cement on the fluidity of cement paste and mortar, **Transactions of JSCE**, 13, p. 199-213, 1991.

NAWY, E. G. **Fundamentals of High Strength High Performance Concrete**. London: Longman Group Limited, 1996. 340p.

NEVILLE, A. M. Water and Concrete: A Love-Hate Relationship. **Concrete International**, v. 22, n. 12, p. 34-38. December, 2000.

NEVILLE, A. M. A “New” Look at High-Alumina Cement. **Concrete International**, p.51-65, August, 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador E. Giamusso, São Paulo. Editora Pini, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. England: Longman Scientific & Technical, 439p. 1987.

NIELSEN, L. F. Strength development in hardened cement paste: examination of some empirical equations. **Materials and Structure**, v. 26, n. 159, June, 255-260. 1993.

NORTON-BERRY, K. J.; GHANBARI AHARI, K.; LEE, W. E. Hydration and Strength Development in Alumina/Magnesia Castable Bond Systems with CAC or Fumed Silica Additives. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 491-501.

NORWEGIAN STANDARD. NS 3473 E: **Concrete Structures: design rules**. 4ed. Oslo, Norway, 1992.

PAULON, V. A. **Estudos de microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**. São Paulo, 1991, 190p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PERENCHIO, W. F.; WHITING, D. A.; KANTRO, D. L. Water reduction, slump loss and entrained air-void system as influenced by superplasticizers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 1., 1978, Ottawa, Canada. **Papers**. Detroit: American Concrete Institute, 1979. p.137-155. (ACI Special Publication, 62).

PETERMAN, M. B.; CARRASQUILLO, R. L. **Production of high-strength concrete**. Austin: University of Texas, 1986, 278p.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Globo, 1980. 308p.

PHELAN, W. S. Admixtures and HPC: A Happy Marriage. **Concrete International**, v. 20, n. 4, p. 35-39, April, 2000.

PHELAN, W. S. Admixtures and Aggregates: Key Elements of Athletic Concrete. **Concrete International**, v. 22, n. 4, April, 1998.

PLISKIN, L. **High-Performance Concrete – Engineering properties and code aspects**. In: MALIER, Y. (editor. High Performance Concrete – from material to structures. London, E&FN Spon, 1992, p.186-195.

- PÖLLMANN, H. Mineralogy and Crystal Chemistry of Calcium Aluminate Cement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 79-119.
- RAMACHANDRAN, V. Recent Progress in the Development of Chemical Admixtures. In: MALHOTRA, V. M. (ed) **Advances in Concrete Technology**. Ottawa:CANMET, p. 785-838. 1994.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. Projeto de Experimentos. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001a, 125p.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. Estatística Industrial. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001b, 135p.
- RIXOM, M. R.; MAILVAGANAM, N. P. **Chemical Admixtures for Concrete**, E and FN Spon, London and New York, 1986, 306p.
- ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. . Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 375-380, 2004.
- ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C.; MORAIS, J. A. Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 77-82, 2003.
- ROUGERON, P.; AÏTCIN, P. C. Optimization of the composition of a high-performance concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 16, n. 2, p. 115-124, 1994.
- RYELL, J.; BICKLEY, J. A. Scotia-Plaza: high-strength concrete for fall buildings. In: SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, **Proceedings**. Stavenger, (ed. I. Holland et al.) Tapia, N-7034 Trondheim NTF, Norway, ISBN 82-519-0797-7, p. 641-53, 1987.
- SATO, K.; PUSHPALAL, G. K. D.; MAEDA N. Chemical Characterization of Hydrothermal Hot-Pressed Calcium Aluminate-Phosphate-Silica Cement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 565-575.
- SARKAR, S. L. The importance of microstructure in evaluating concrete. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, Athens, 1992. **Proceedings**. Montreal: CANMET, 1992, p. 123-158.
- SCRIVENER, K. L. Historical and Present Day Applications of Calcium Aluminate Cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 3-23.
- SCRIVENER, K. L.; CABIRON, J. L.; LETOURNEUX, R. High-Performance Concretes from calcium aluminate cements. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1215-1223, 1999.
- SHAH, S. P. High-Strength Concrete – A Workshop Summary. **Concrete International**, v. 3, n. 5, p. 94-98, May, 1981.
- SHAH, S. P.; LI, Z.; LANGE, D. A. Properties of Aggregate-Cement Interface for High-Performance Concrete. In: NINTH CONFERENCE ON ENGINEERING MECHANICS, American Society of Civil Engineers, New York, NY, **Proceedings**, p. 852-855. 1992.

SMITH, G. J.; RAD, F. N. Economics advantages of high-strength concrete in columns. **Concrete International**, v. 11, n.4, p. 37-43, April, 1989.

TAHER, M. A.; CHANDLER, H. W.; ANDERSON, A. Factors influencing consistency of strength of high alumina cement. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 7, p. 491-500, Oct, 1996.

TAGNIT-HAMOU, A.; AİTCIN, P. C. Cement superplasticizer compatibility. **World Cement**, London, v. 24, n. 8, p. 38-42, August, 1993.

TOUZO, B.; BELL, D.; SCRIVENER, K. L.; PARR, C. Application of Calcium Aluminate Cement in Alumina-Spinel Castables, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CALCIUM ALUMINATE CEMENTS (CAC), July, 2001, Edinburgh. UK. **Proceedings**. p. 503-515.

YAMAMOTO, Y.; KOBAYASHI, S. Effect of temperature on the properties of superplasticized concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 83, p. 80-87, Jan/Feb, 1986.

ANEXO A

QUADRO 1. A – TRAÇOS DE CONCRETO CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO – 1ª REPETIÇÃO

TRAÇO	23SA0	23SA10	23SA20	25SA5	25SA15
Água (kg)	130,7	123,8	130,7	118,8	135
Cimento (kg)	500	548	400	589	510
Sílica Ativa (kg)	0	61	100	31	90
Relação a/agl	0,23	0,23	0,23	0,25	0,25
Ag. Miúdo (kg)	797	688	760	672	658
Ag. Graúdo (kg)	1001	999	1001	998	999
Aditivo (%)	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780
Abatimento (mm)	200	255	250	220	250
Ar Incorporado (%)	1,0	0,4	1,1	1,0	0,3
Massa Específica (kg/m ³)	2464,5	2491,8	2421,2	2487,3	2531,2
Teor de Argamassa (%)	56	56	56	56	56
Umidade Relativa (%)	57	71	59	66	72
Temperatura Ambiente (°C)	21,5	20,7	21,3	20,8	20,2
Temperatura Mistura (°C)	23,3	23,3	24,1	23,1	22,8

QUADRO 2. A – TRAÇOS DE CONCRETO CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO – 1ª REPETIÇÃO

TRAÇO	28SA0	28SA10	28SA20	32SA5	32SA15
Água (kg)	122,7	116,9	124,7	131,8	106,1
Cimento (kg)	500	499	400	431	386
Sílica Ativa (kg)	0	55	100	23	68
Relação a/agl	0,28	0,28	0,28	0,32	0,32
Ag. Miúdo (kg)	802	723	768	823	832
Ag. Graúdo (kg)	1004	998	999	999	998
Aditivo (%)	0,780	0,780	0,780	0,635	0,635
Abatimento (mm)	220	225	235	220	220
Ar Incorporado (%)	1,3	0,6	0,3	0,4	1,0
Massa Específica (kg/m ³)	2464,5	2485,3	2473,6	2497,1	2477,1
Teor de Argamassa (%)	56	56	56	56	56
Umidade Relativa (%)	55	72	61	69	66
Temperatura Ambiente (°C)	21,3	20,7	20,7	20,8	20,8
Temperatura Mistura (°C)	22,2	22,0	22,4	23,0	22,1

QUADRO 3. A – TRAÇOS DE CONCRETO CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO – 1ª REPETIÇÃO

TRAÇO	37SA0	37SA10	37SA20
Água (kg)	132,2	124,9	137
Cimento (kg)	500	341	414
Sílica Ativa (kg)	0	38	104
Relação a/agl	0,37	0,37	0,37
Ag. Miúdo (kg)	799	890	733
Ag. Graúdo (kg)	999	1004	999
Aditivo (%)	0,635	0,635	0,635
Abatimento (mm)	220	220	265
Ar Incorporado (%)	1,0	1,1	0,5
Massa Específica (kg/m ³)	2459,4	2459,4	2426,3
Teor de Argamassa (%)	57	56	56
Umidade Relativa (%)	56	58	65
Temperatura Ambiente (°C)	21,7	20,9	21,2
Temperatura Mistura (°C)	23,6	22,5	23,7

QUADRO 4. A – TRAÇOS DE CONCRETO CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO – 2ª REPETIÇÃO

TRAÇO	23SA0	23SA10	23SA20	25SA5	25SA15
Água (kg)	132,7	128,8	130,7	121,7	123,7
Cimento (kg)	500	548	400	532	476
Sílica Ativa (kg)	0	61	100	28	84
Relação a/agl	0,23	0,23	0,23	0,25	0,25
Ag. Miúdo (kg)	796	683	760	741	722
Ag. Graúdo (kg)	1000	999	1001	1004	1000
Aditivo (%)	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780
Abatimento (mm)	210	265	245	220	250
Ar Incorporado (%)	1,0	0,3	0,4	1,0	0,4
Massa Específica (kg/m ³)	2483,6	2493,8	2468,3	2484,8	2493,7
Teor de Argamassa (%)	56	56	56	56	56
Umidade Relativa (%)	63	76	59	57	69
Temperatura Ambiente (°C)	18,7	22,1	21,3	21,5	22,0
Temperatura Mistura (°C)	20,0	23,7	24,1	21,4	23,4

QUADRO 5. A – TRAÇOS DE CONCRETO CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO – 2ª REPETIÇÃO

TRAÇO	28SA0	28SA10	28SA20	32SA5	32SA15
Água (kg)	130,7	123,7	130,7	130,8	130,1
Cimento (kg)	500	450	400	431	386
Sílica Ativa (kg)	0	50	100	23	68
Relação a/agl	0,28	0,28	0,28	0,32	0,32
Ag. Miúdo (kg)	799	789	762	623	802
Ag. Graúdo (kg)	999	1000	999	1000	1004
Aditivo (%)	0,780	0,780	0,780	0,635	0,635
Abatimento (mm)	220	250	265	230	230
Ar Incorporado (%)	0,9	0,7	0,4	0,5	1,1
Massa Específica (kg/m ³)	2477,2	2477,2	2461,9	2456,8	2459,4
Teor de Argamassa (%)	56	56	56	56	56
Umidade Relativa (%)	67	68	66	65	56
Temperatura Ambiente (°C)	21,3	22,8	21,3	21,5	20,5
Temperatura Mistura (°C)	23,9	22,4	23,9	23,2	22,3

QUADRO 6. A – TRAÇOS DE CONCRETO CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO – 2ª REPETIÇÃO

TRAÇO	37SA0	37SA10	37SA20
Água (kg)	134,2	130,7	137,0
Cimento (kg)	500	353	414
Sílica Ativa (kg)	0	39	104
Relação a/agl	0,37	0,37	0,37
Ag. Miúdo (kg)	796	880	759
Ag. Graúdo (kg)	1000	1000	999
Aditivo (%)	0,635	0,635	0,635
Abatimento (mm)	230	210	230
Ar Incorporado (%)	1,0	1,0	1,3
Massa Específica (kg/m ³)	2484,9	2477,2	2436,5
Teor de Argamassa (%)	56	56	56
Umidade Relativa (%)	63	68	57
Temperatura Ambiente (°C)	18,9	21,3	21,3
Temperatura Mistura (°C)	20,6	22,8	24,3

ANEXO B

QUADRO 1. B – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)

TRAÇO	IDADE							
	3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS		63 DIAS	
23SA0	48,6	38,2	60,0	60,2	57,7	63,9	62,0	60,8
	55,2	53,7	64,9	63,2	51,6	63,9	69,7	75,8
	Média = 48,9		Média = 62,1		Média = 60,5		Média = 67,1	
	Desvio Padrão = 7,69		Desvio Padrão = 2,39		Desvio Padrão = 7,51		Desvio Padrão = 7,03	
	CV (%) = 15,71		CV (%) = 3,84		CV (%) = 12,41		CV (%) = 10,48	
23SA10	58,4	57,8	71,2	68,5	70,4	81,7	80,7	81,1
	63,5	70,5	67,7	53,0	62,0	58,2	80,8	87,4
	Média = 62,5		Média = 65,1		Média = 68,1		Média = 82,5	
	Desvio Padrão = 5,88		Desvio Padrão = 8,20		Desvio Padrão = 10,42		Desvio Padrão = 3,27	
	CV (%) = 9,41		CV (%) = 12,60		CV (%) = 15,30		CV (%) = 3,96	
23SA20	53,9	57,9	65,9	62,2	58,9	69,6	70,4	71,0
	58,6	58,1	57,9	59,0	62,3	70,6	69,9	69,9
	Média = 57,1		Média = 61,3		Média = 65,4		Média = 70,3	
	Desvio Padrão = 2,17		Desvio Padrão = 3,60		Desvio Padrão = 5,67		Desvio Padrão = 0,52	
	CV (%) = 3,80		CV (%) = 5,87		CV (%) = 8,68		CV (%) = 0,74	
25SA5	58,8	64,5	70,7	56,1	68,7	70,4	71,8	73,8
	60,1	63,2	67,3	60,2	70,5	68,3	79,0	71,6
	Média = 61,6		Média = 63,6		Média = 69,5		Média = 74,0	
	Desvio Padrão = 2,65		Desvio Padrão = 6,63		Desvio Padrão = 1,14		Desvio Padrão = 3,45	
	CV (%) = 4,30		CV (%) = 10,43		CV (%) = 1,64		CV (%) = 4,65	
25SA15	60,3	50,2	67,2	62,0	62,8	74,6	76,7	75,1
	64,8	64,1	62,5	68,2	66,7	58,2	81,5	78,5
	Média = 59,9		Média = 65,0		Média = 65,6		Média = 78,0	
	Desvio Padrão = 6,73		Desvio Padrão = 3,18		Desvio Padrão = 6,95		Desvio Padrão = 2,74	
	CV (%) = 11,25		CV (%) = 4,89		CV (%) = 10,59		CV (%) = 3,52	
28SA0	52,9	53,3	59,3	62,6	63,0	53,2	64,9	54,1
	53,6	56,8	54,8	74,4	57,8	65,1	65,3	64,5
	Média = 54,1		Média = 62,8		Média = 59,8		Média = 62,2	
	Desvio Padrão = 1,79		Desvio Padrão = 8,38		Desvio Padrão = 5,35		Desvio Padrão = 5,41	
	CV (%) = 3,31		CV (%) = 13,35		CV (%) = 8,95		CV (%) = 8,70	
28SA10	62,8	72,4	79,8	77,3	78,3	77,1	85,0	83,4
	57,9	52,3	54,1	52,9	55,5	52,9	73,0	69,6
	Média = 61,4		Média = 66,0		Média = 66,0		Média = 77,7	
	Desvio Padrão = 8,52		Desvio Padrão = 14,51		Desvio Padrão = 13,62		Desvio Padrão = 7,60	
	CV (%) = 13,90		CV (%) = 21,97		CV (%) = 20,65		CV (%) = 9,78	

QUADRO 2. B – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)

TRAÇO	IDADE							
	3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS		63 DIAS	
28SA20	53,8	48,3	63,0	48,8	76,5	83,9	86,8	75,0
	53,0	63,0	62,8	57,8	67,7	55,9	60,6	64,0
	Média = 54,5		Média = 58,1		Média = 71,0		Média = 71,6	
	Desvio Padrão = 6,15		Desvio Padrão = 6,65		Desvio Padrão = 12,05		Desvio Padrão = 11,85	
	CV (%) = 11,28		CV (%) = 11,45		CV (%) = 16,97		CV (%) = 16,55	
32SA5	55,6	58,0	67,2	62,0	64,7	60,0	59,5	65,1
	51,6	48,4	58,4	53,7	58,8	54,1	74,5	64,9
	Média = 53,4		Média = 60,3		Média = 59,4		Média = 66,0	
	Desvio Padrão = 4,25		Desvio Padrão = 5,71		Desvio Padrão = 4,36		Desvio Padrão = 6,23	
	CV (%) = 7,96		CV (%) = 9,46		CV (%) = 7,33		CV (%) = 9,44	
32SA15	53,3	62,9	56,2	58,8	72,9	68,2	81,1	76,3
	52,6	58,9	61,7	66,3	60,3	56,1	67,5	68,7
	Média = 56,9		Média = 60,8		Média = 64,4		Média = 73,4	
	Desvio Padrão = 4,88		Desvio Padrão = 4,33		Desvio Padrão = 7,58		Desvio Padrão = 6,44	
	CV (%) = 8,57		CV (%) = 7,13		CV (%) = 11,78		CV (%) = 8,78	
37SA0	33,2	29,9	57,4	52,8	51,2	59,3	57,1	55,3
	32,6	25,1	50,7	52,9	50,1	49,6	56,7	67,5
	Média = 30,2		Média = 53,5		Média = 52,6		Média = 59,15	
	Desvio Padrão = 3,69		Desvio Padrão = 2,82		Desvio Padrão = 4,55		Desvio Padrão = 5,62	
	CV (%) = 12,22		CV (%) = 5,28		CV (%) = 8,66		CV (%) = 9,50	
37SA10	50,9	49,8	47,7	51,5	66,6	62,9	69,3	65,3
	52,9	56,3	63,8	59,3	66,5	70,0	82,1	66,8
	Média = 52,5		Média = 55,6		Média = 66,5		Média = 70,9	
	Desvio Padrão = 2,85		Desvio Padrão = 7,31		Desvio Padrão = 2,90		Desvio Padrão = 7,66	
	CV (%) = 5,44		CV (%) = 13,15		CV (%) = 4,36		CV (%) = 10,81	
37SA20	58,6	57,9	59,1	61,8	64,1	63,8	65,8	72,8
	49,2	58,1	66,7	53,3	78,1	57,3	76,8	71,8
	Média = 56,0		Média = 60,2		Média = 65,8		Média = 71,8	
	Desvio Padrão = 4,51		Desvio Padrão = 5,59		Desvio Padrão = 8,76		Desvio Padrão = 4,55	
	CV (%) = 8,06		CV (%) = 9,28		CV (%) = 13,31		CV (%) = 6,33	

QUADRO 3. B – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

TRAÇO	IDADE							
	3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS		63 DIAS	
23SA0	4,2	3,8	3,7	3,6	4,1	3,9	3,4	3,8
	4,4	5,1	4,9	4,5	4,7	3,6	4,4	4,0
	Média = 4,4		Média = 4,2		Média = 4,1		Média = 3,9	
	Desvio Padrão = 0,53		Desvio Padrão = 0,61		Desvio Padrão = 0,49		Desvio Padrão = 0,42	
	CV (%) = 12,15		CV (%) = 14,73		CV (%) = 12,01		CV (%) = 10,62	
23SA10	3,7	4,2	3,7	5,1	3,6	4,4	3,2	3,4
	4,8	5,0	3,6	4,6	3,8	3,9	3,3	3,4
	Média = 4,4		Média = 4,2		Média = 3,9		Média = 3,3	
	Desvio Padrão = 0,58		Desvio Padrão = 0,72		Desvio Padrão = 0,37		Desvio Padrão = 0,12	
	CV (%) = 13,04		CV (%) = 16,97		CV (%) = 9,33		CV (%) = 3,48	
23SA20	3,8	4,6	3,8	3,8	4,5	4,7	4,7	4,7
	5,5	4,6	4,7	3,3	2,8	4,1	4,7	4,8
	Média = 4,6		Média = 3,9		Média = 4,0		Média = 4,7	
	Desvio Padrão = 0,69		Desvio Padrão = 0,61		Desvio Padrão = 0,85		Desvio Padrão = 0,04	
	CV (%) = 15,09		CV (%) = 15,49		CV (%) = 20,96		CV (%) = 0,83	
25SA5	0,6	0,5	5,4	3,9	3,5	3,8	4,1	2,9
	0,6	0,6	4,0	4,3	5,1	3,9	3,7	4,4
	Média = 0,6		Média = 4,4		Média = 4,1		Média = 3,8	
	Desvio Padrão = 0,04		Desvio Padrão = 0,67		Desvio Padrão = 0,70		Desvio Padrão = 0,67	
	CV (%) = 15,09		CV (%) = 15,28		CV (%) = 17,26		CV (%) = 17,77	
25SA15	3,9	2,9	4,6	4,4	3,8	3,2	4,5	4,7
	1,3	4,3	4,7	4,7	5,0	2,9	4,8	4,6
	Média = 3,1		Média = 4,6		Média = 3,7		Média = 4,7	
	Desvio Padrão = 1,35		Desvio Padrão = 0,13		Desvio Padrão = 0,92		Desvio Padrão = 0,13	
	CV (%) = 43,93		CV (%) = 2,82		CV (%) = 24,97		CV (%) = 2,78	
28SA0	4,1	3,9	3,9	3,2	3,9	3,1	3,6	4,5
	4,4	4,2	4,0	3,0	3,8	3,5	4,6	4,3
	Média = 4,1		Média = 3,5		Média = 3,6		Média = 4,2	
	Desvio Padrão = 0,20		Desvio Padrão = 0,51		Desvio Padrão = 0,37		Desvio Padrão = 0,43	
	CV (%) = 4,74		CV (%) = 14,43		CV (%) = 10,46		CV (%) = 10,12	
28SA10	2,2	2,0	4,8	5,2	3,2	4,3	4,0	4,5
	2,6	2,9	3,4	3,9	3,5	3,9	4,3	3,7
	Média = 2,4		Média = 4,3		Média = 3,7		Média = 4,1	
	Desvio Padrão = 0,43		Desvio Padrão = 0,82		Desvio Padrão = 0,49		Desvio Padrão = 0,32	
	CV (%) = 17,78		CV (%) = 19,14		CV (%) = 13,21		CV (%) = 7,70	

QUADRO 4. B –ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

TRAÇO	IDADE							
	3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS		63 DIAS	
28SA20	4,7	4,1	5,3	3,9	4,2	4,7	4,1	4,3
	4,8	5,0	3,6	4,6	3,8	3,9	4,4	4,3
	Média = 4,9		Média = 4,4		Média = 4,1		Média = 4,3	
	Desvio Padrão = 0,17		Desvio Padrão = 0,78		Desvio Padrão = 0,38		Desvio Padrão = 0,13	
	CV (%) = 3,51		CV (%) = 17,94		CV (%) = 9,28		CV (%) = 3,08	
32SA5	3,2	3,4	2,3	3,2	3,4	3,2	4,1	4,5
	2,7	3,0	4,0	3,6	3,6	3,8	4,2	4,3
	Média = 3,1		Média = 3,3		Média = 3,5		Média = 4,3	
	Desvio Padrão = 0,27		Desvio Padrão = 0,94		Desvio Padrão = 0,26		Desvio Padrão = 0,17	
	CV (%) = 9,01		CV (%) = 22,61		CV (%) = 7,45		CV (%) = 3,99	
32SA15	1,6	1,2	3,4	2,8	4,7	4,1	4,2	3,2
	1,4	1,5	4,7	4,1	3,9	3,1	4,6	3,8
	Média = 1,4		Média = 3,7		Média = 4,0		Média = 3,9	
	Desvio Padrão = 0,19		Desvio Padrão = 0,81		Desvio Padrão = 0,64		Desvio Padrão = 0,59	
	CV (%) = 13,14		CV (%) = 21,54		CV (%) = 16,27		CV (%) = 15,02	
37SA0	3,4	3,8	4,0	2,6	3,9	4,3	3,6	3,5
	4,6	4,5	3,9	4,2	4,5	4,6	3,5	4,6
	Média = 4,1		Média = 3,7		Média = 4,3		Média = 3,8	
	Desvio Padrão = 0,55		Desvio Padrão = 0,72		Desvio Padrão = 0,31		Desvio Padrão = 0,52	
	CV (%) = 13,51		CV (%) = 19,74		CV (%) = 7,23		CV (%) = 13,73	
37SA10	3,0	3,3	3,2	4,2	5,2	4,4	4,1	4,1
	3,1	2,9	3,1	3,4	3,9	4,0	5,0	3,5
	Média = 3,1		Média = 3,5		Média = 4,4		Média = 4,2	
	Desvio Padrão = 0,16		Desvio Padrão = 0,51		Desvio Padrão = 0,56		Desvio Padrão = 0,62	
	CV (%) = 5,18		CV (%) = 14,69		CV (%) = 12,78		CV (%) = 14,75	
37SA20	3,6	3,9	4,7	3,8	4,4	4,2	4,4	4,3
	4,7	4,7	3,9	5,2	4,8	4,9	4,2	4,4
	Média = 4,2		Média = 4,4		Média = 4,5		Média = 4,3	
	Desvio Padrão = 0,56		Desvio Padrão = 0,68		Desvio Padrão = 0,35		Desvio Padrão = 0,08	
	CV (%) = 13,28		CV (%) = 15,40		CV (%) = 7,61		CV (%) = 1,77	

ANEXO C

ANÁLISE PETROGRÁFICA DA ROCHA

A análise petrográfica foi realizada no Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná, cujos resultados serão apresentados a seguir.

1. Mineralogia

QUADRO 1. C – MINERALOGIA DA ROCHA

MINERAL	COMPOSIÇÃO DA ROCHA (%)
Feldspato Potássico (Ortoclásio)	55
Quartzo	45
Clinopiroxênio (Egirina)	traço
Opacos	traço
Argilominerais	traço
Clorita	traço

2. Características Microscópicas

Rocha de coloração cinza, matriz afanítica (minerais de granulação muito fina) com fenocristal de feldspato potássico (0,1 a 0,2 cm) e quartzo (0,1 cm). A matriz é constituída principalmente por feldspato potássico e quartzo, além de clinopiroxênio, opacos, argilominerais e clorita.

O feldspato potássico ocorre como fenocristal de hábito retangular (15%) e constituinte principal da matriz de granulação fina (40%). Esse material é Euédrico a subédrico, pouco fraturado. Alguns cristais estão parcialmente e/ou totalmente alterados para argilominerais.

O quartzo ocorre como fenocristal (15%), sendo o constituinte principal da matriz de granulação fina (30%). Material Anédrico a subédrico, e pouco fraturado.

Já o clinopiroxênio tem granulação fina, subédrica a anédrica. Encontra-se parcialmente e/ou totalmente cloritizado.

Os minerais opacos têm granulação fina a média, anédricos a subédricos, e estão presentes na matriz da rocha. Os argilominerais têm granulação muito fina e são provenientes da alteração hidrotermal do feldspato potássico.

A Clorita tem granulação fina e constitui o mineral de alteração hidrotermal do clinopiroxênio.

3. Características Macroscópicas

Rocha de textura Fanerítica Inequigranular Porfírica, com estrutura Isótropa e/ou maciça caracterizada pela falta de orientação dos minerais constituintes da rocha. Não há presença de estado microfissural. O grau de alteração é considerado médio, com argilização do feldspato potássico e cloritização do clinopiroxênio.

As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 1. C a seguir:

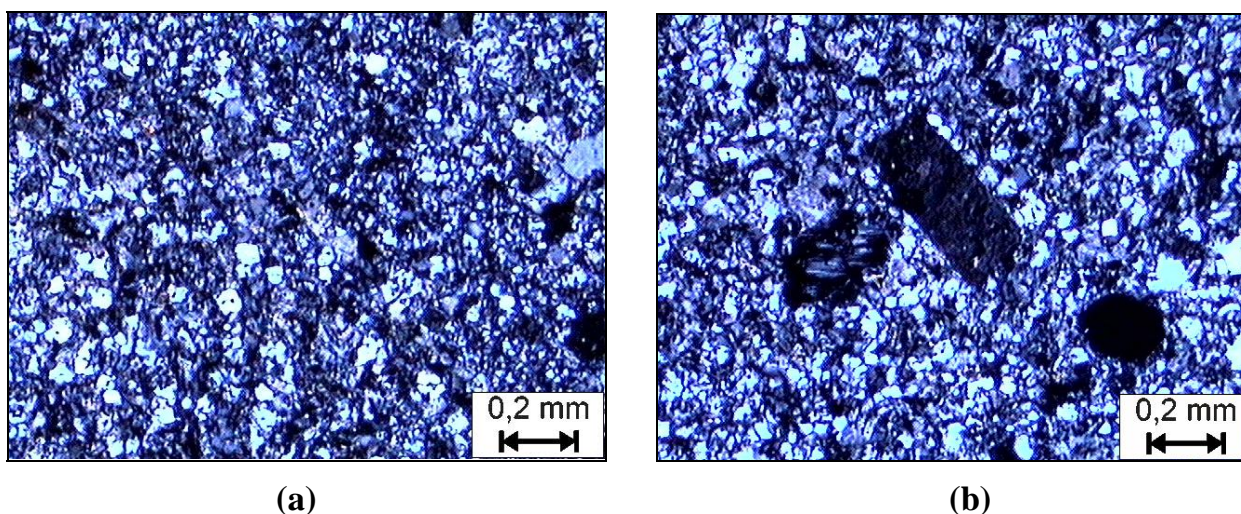


FIGURA 1. C – IMAGEM MICROGRÁFICA EM LUZ POLARIZADA – (a) MATRIZ DE GRANULAÇÃO FINA CONSTITUÍDA PRINCIPALMENTE POR QUARTZO E FELDSPATO POTÁSSICO (b) DETALHE DE UM FENOCRISTAL RETANGULAR DE FELDSPATO POTÁSSICO EM MEIO A MATRIZ QUARTZO-FELDSPÁTICA DE GRANULAÇÃO FINA.

ANEXO D

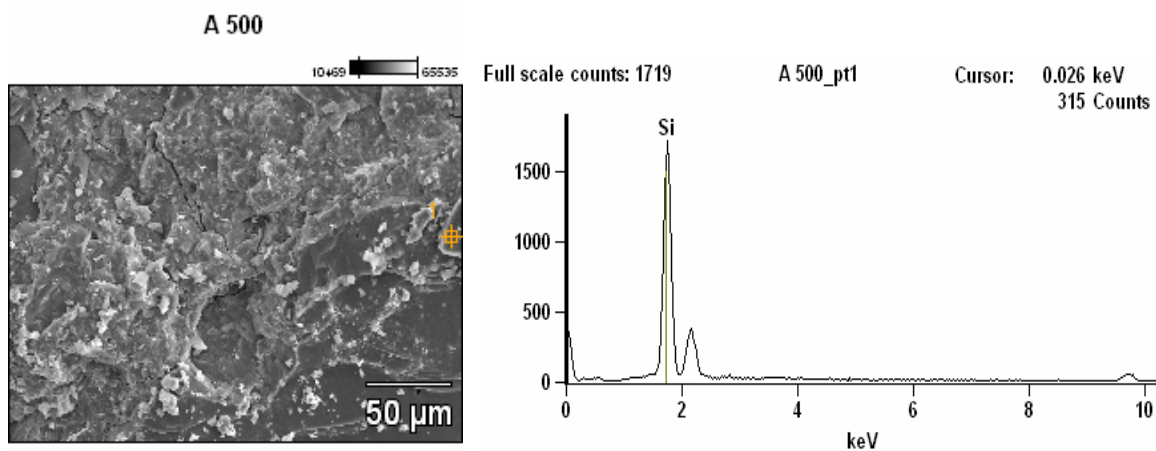


FIGURA 1. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,23; TEOR DE SÍLICA 0%)

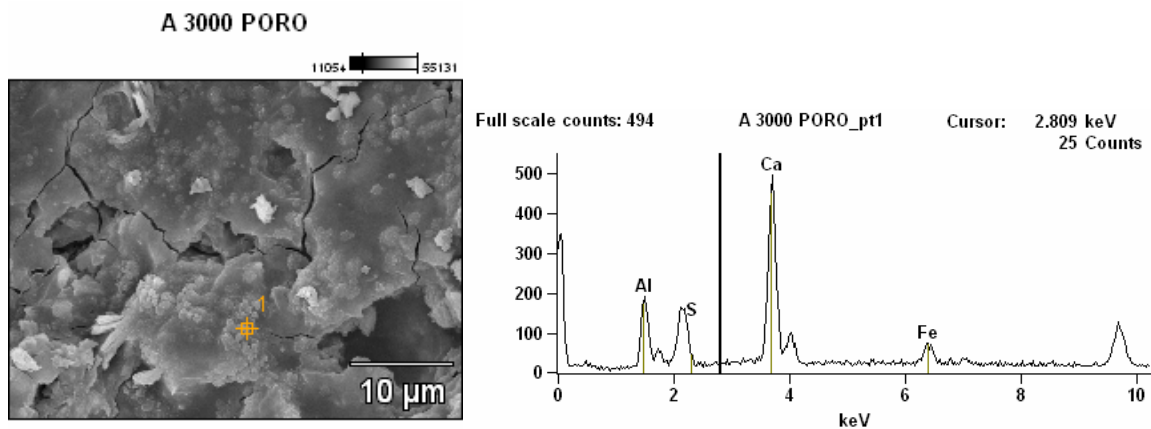


FIGURA 2. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,23; TEOR DE SÍLICA 0%)

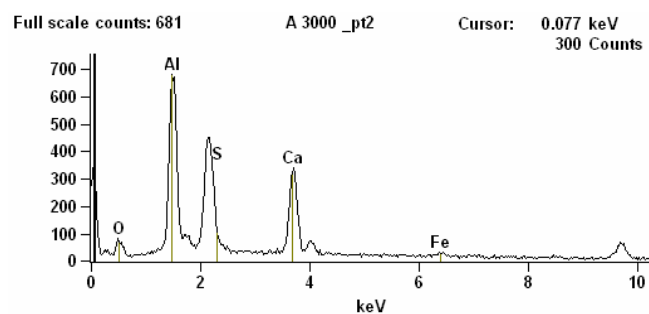
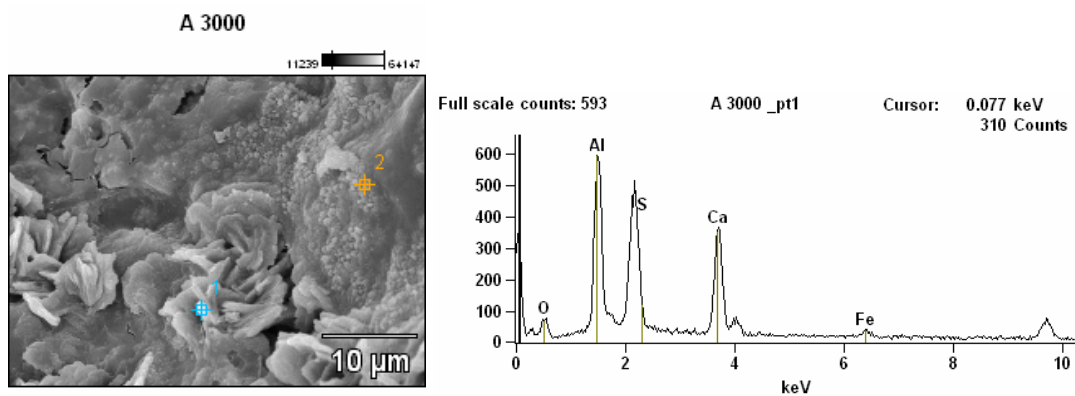


FIGURA 3. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%)

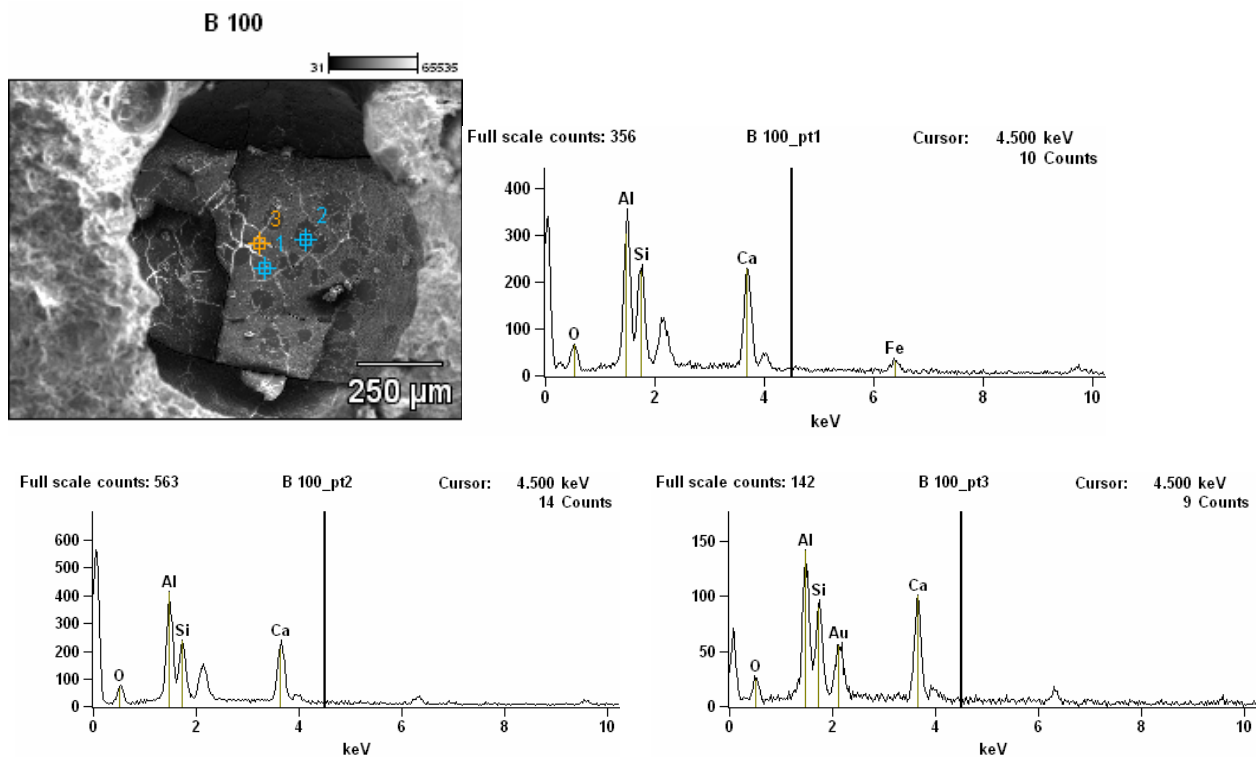


FIGURA 4. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%)

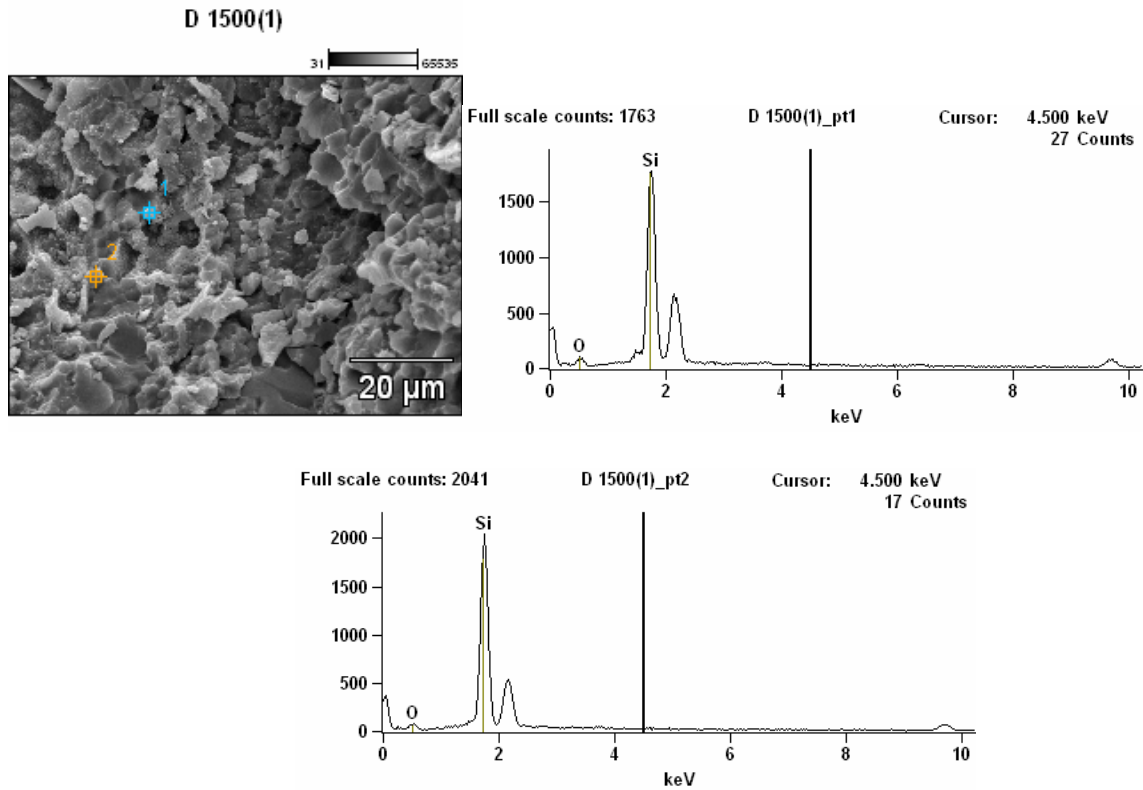


FIGURA 5. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%)

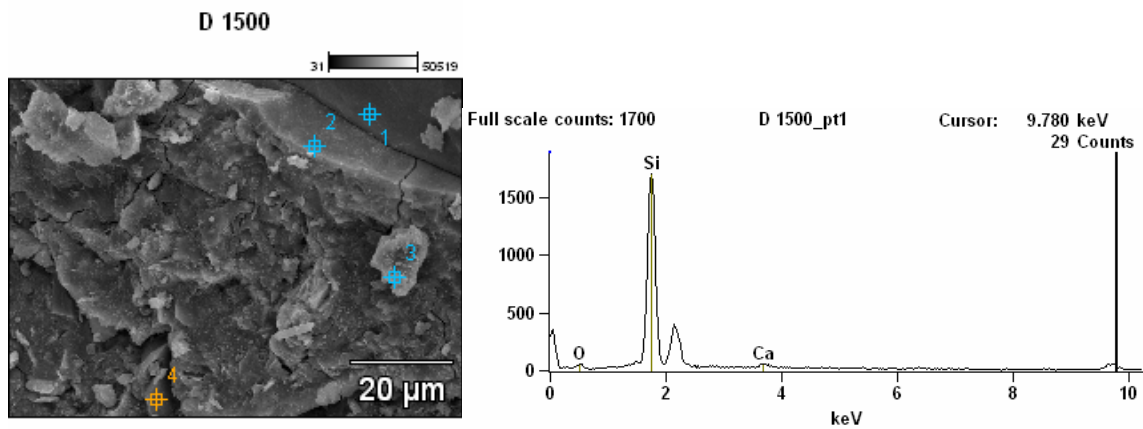


FIGURA 6. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%)

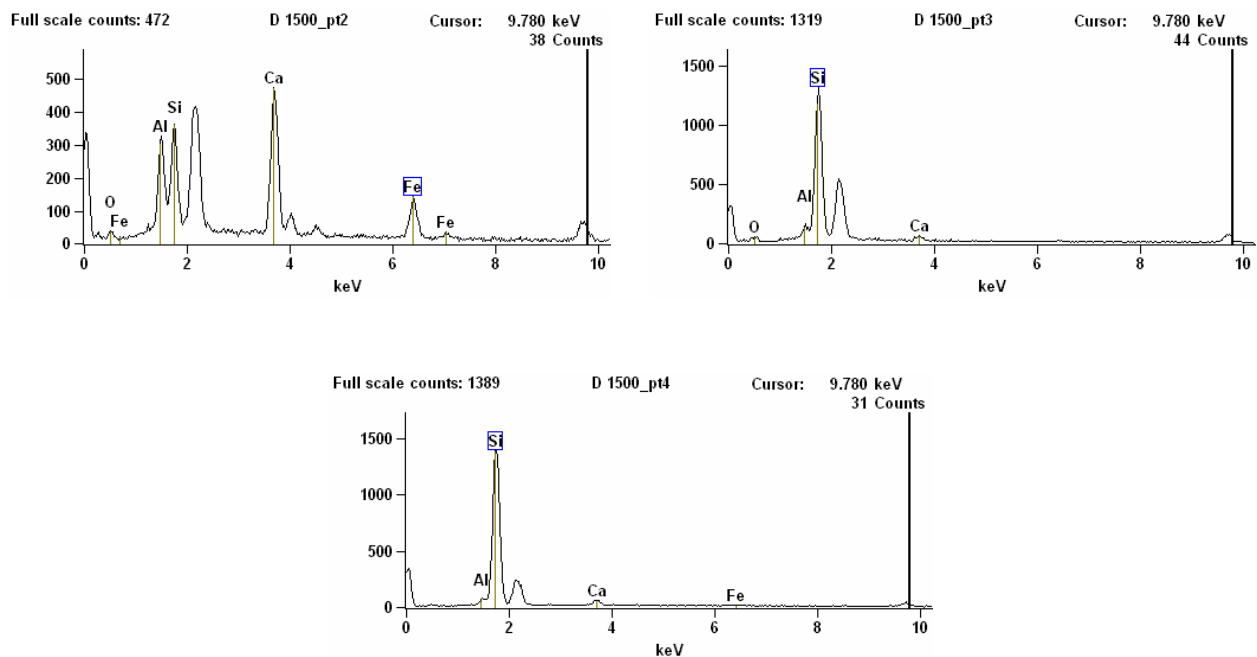


FIGURA 7. D – EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%)

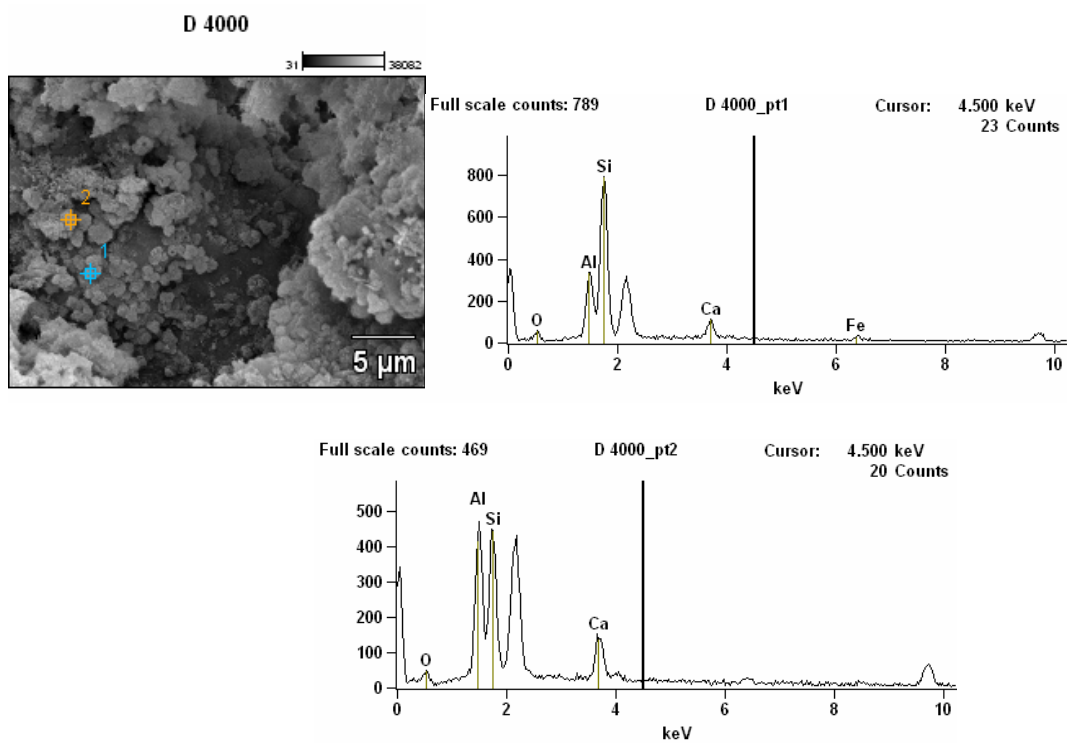


FIGURA 8. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%)

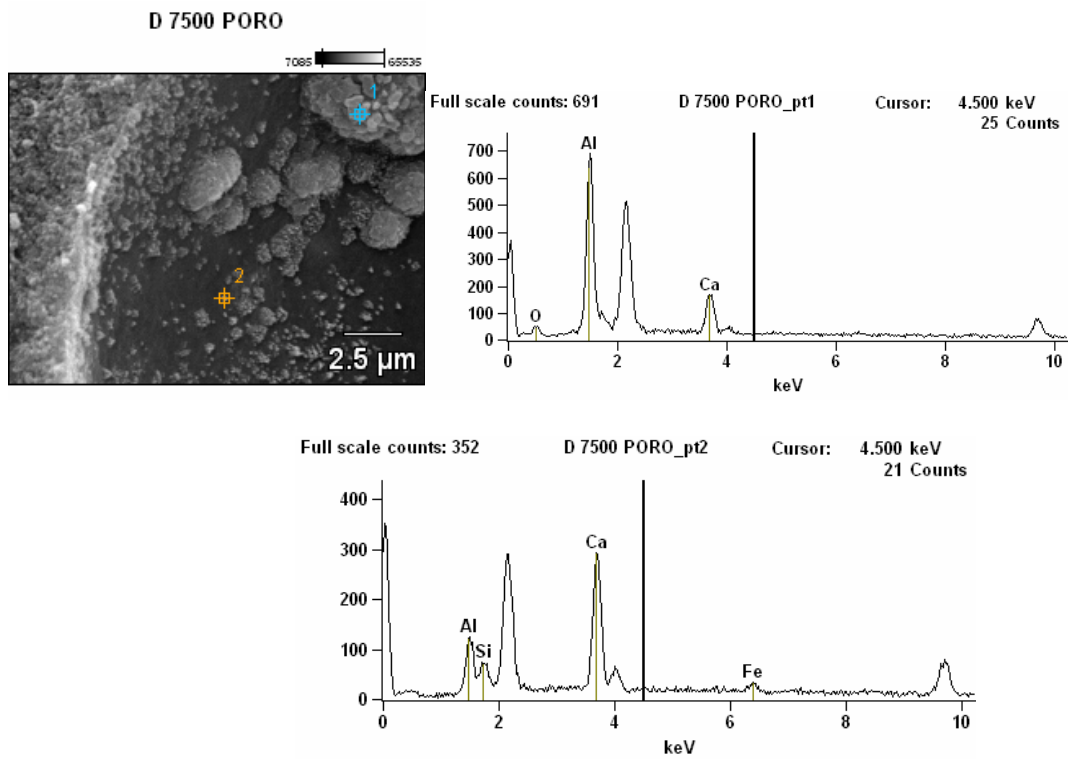


FIGURA 9. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,28; TEOR DE SÍLICA 10%)

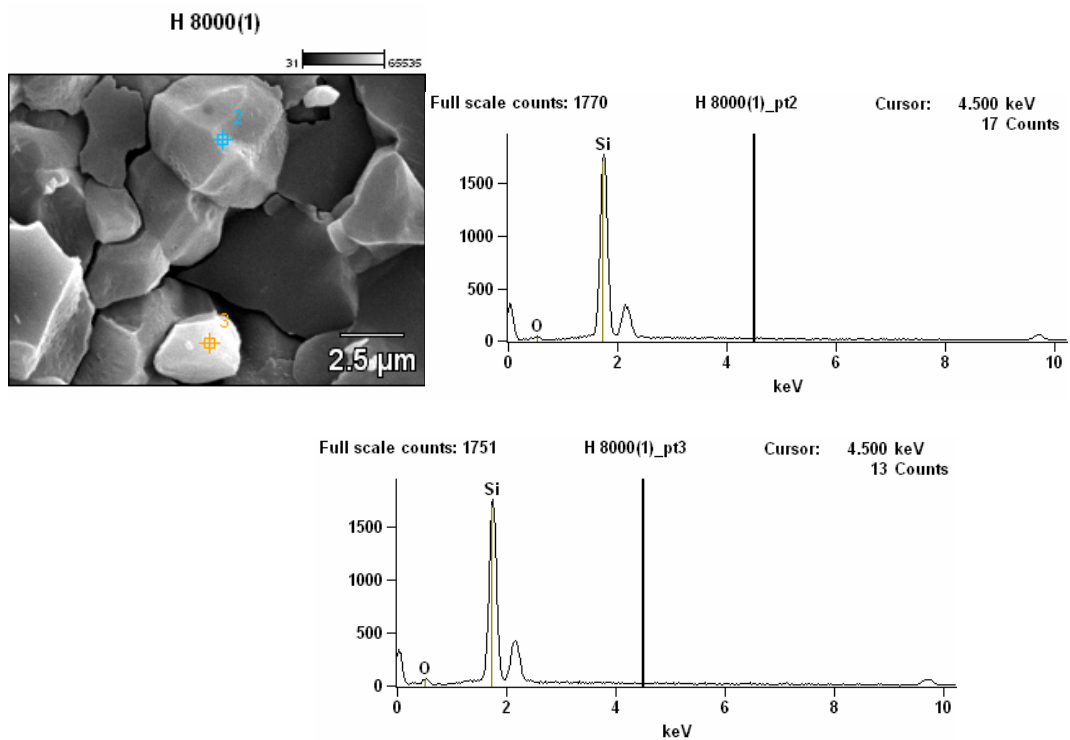


FIGURA 12. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,32; TEOR DE SÍLICA 15%)

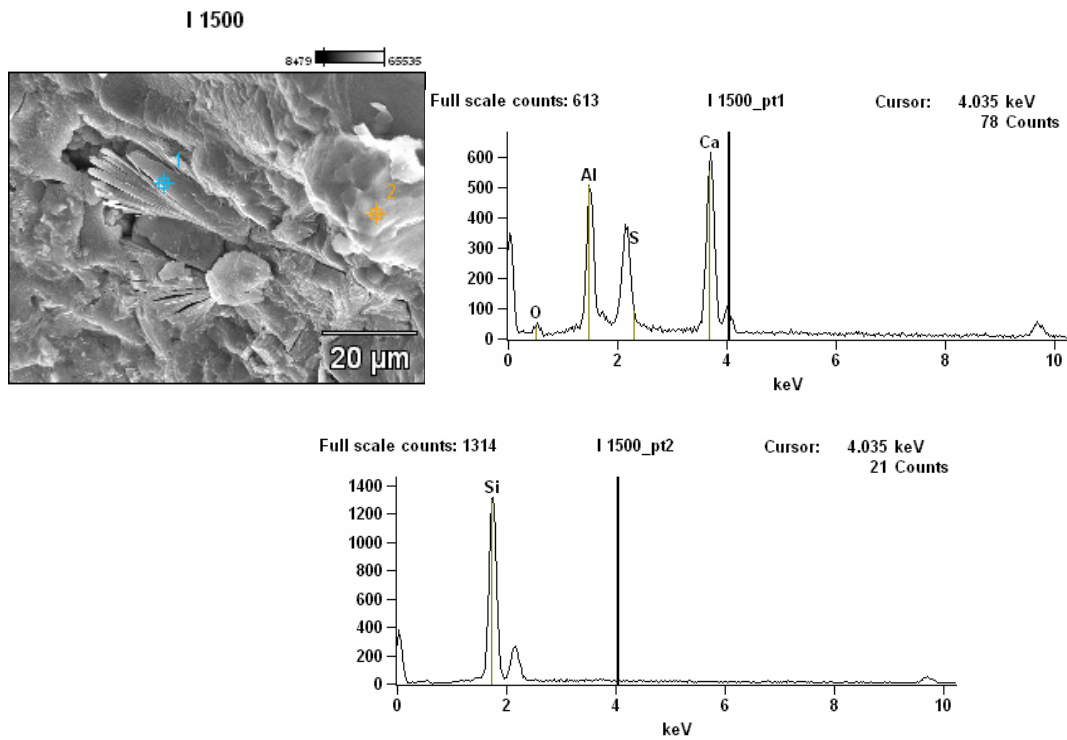


FIGURA 13. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,37; TEOR DE SÍLICA 0%)

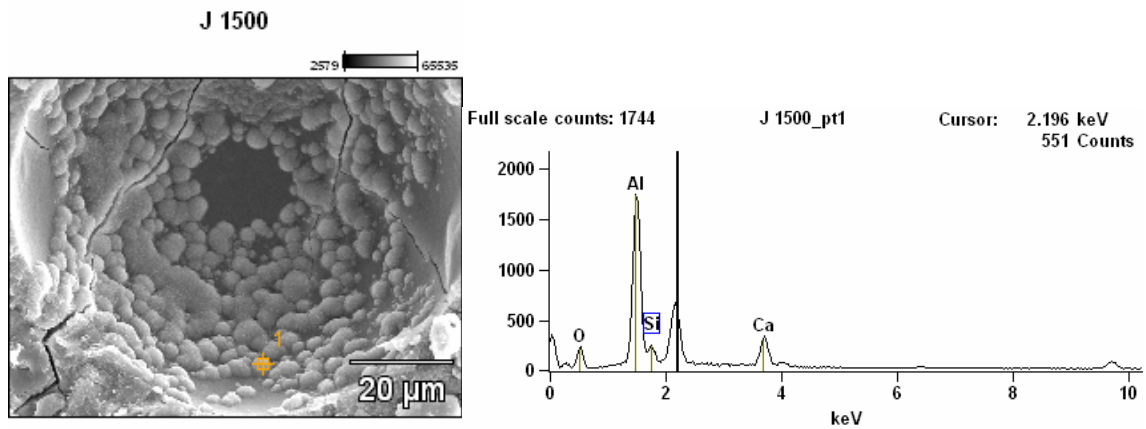


FIGURA 14. D – MICROGRAFIA E EDS - CONCRETO (A/AGL 0,37; TEOR DE SÍLICA 20%)